

述评与讨论

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.14.001

我国重点流域典型污水厂污泥处理处置方式调研与分析

谭学军, 王磊

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘要: 调研了我国重点流域11座城市106座典型污水厂的污泥处理方式、处置途径和技术路线。结果表明,我国重点流域污泥处置方式主要包括填埋、焚烧、建材利用和土地利用。填埋所占比例为53.79%,主要与城市生活垃圾进行混合填埋;焚烧所占比例为18.31%,以电厂协同焚烧为主,单独焚烧所占比例较低;建材利用所占比例为16.08%,主要方式为制水泥和制砖;土地利用所占比例为11.01%,处置方式主要为园林绿化和土地改良。此外,基于调研探讨了我国污泥处理处置发展方向。

关键词: 重点流域; 污水处理厂; 污泥处理; 污泥处置

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)14-0001-08

Investigation and Analysis on the Treatment and Disposal Methods of Typical Sewage Treatment Plant Sludge in China's Key River Basins

TAN Xue-jun, WANG Lei

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

Abstract: This work investigated the sludge treatment methods, disposal pathways and technical routes of 106 typical sewage treatment plants in 11 cities located in China's key river basins. The results show that the disposal pathways of sludge in China's key river basins included landfill, incineration, building materials utilization and land utilization. The proportion of landfills was 53.79%, mainly mixed landfilling with urban household waste. The proportion of incineration was 18.31%, and coordinated incineration in power plants was the main method, while the proportion of separate incineration was relatively low. The proportion of building materials utilization was 16.08%, and the main ways of sludge utilization were cement making and brick making. And the proportion of land utilization was 11.01%, while the main disposal modes were landscaping and land reclamation. In addition, the development direction of sludge treatment and disposal in China was discussed based on the investigation.

Key words: key river basins; sewage treatment plant; sludge treatment; sludge disposal

随着我国污水处理设施建设的快速发展,污泥产生量日益增加,我国城镇污泥产量已达到4 300×10⁴ t/a(以含水率80%计),污泥处理处置所面临的问题越来越严峻^[1]。

污泥处理处置现状调研分析是污泥规划的基础,为此对我国重点流域具有代表性的城镇污水处理厂的污泥处理方式、处置途径、技术路线进行调研,全面分析污泥脱水、厌氧消化、好氧发酵、干化

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1908701)

焚烧等污泥处理技术的应用现状和存在问题,对填埋、土地利用、建材利用等污泥处置方式在国内外应用情况进行比较,并探讨我国污泥处理处置的发展方向。

1 研究方法

调研时间跨度为2012年1月—2014年12月,调研范围覆盖太湖、巢湖、海河、辽河、滇池和三峡库区及上游等6大流域,包括上海、常州、嘉兴、太仓、无锡、合肥、天津、唐山、赤峰、昆明、重庆等11座城市的106座城镇污水厂(见表1),总设计污水处理能力为 $1\,519\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,实际污水处理能力 $1\,264\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,污泥年产生量为 $313\times 10^4\text{ t}$ (污泥含水率80%),污水处理能力和污泥产量均达到全国总量的10%。污泥产量、污泥含水率等数据来自所调研污水厂的运行日报表,污泥处理设施运行工艺参数、处理成本等来自运行报表或者设计文件。

表1 调研范围内污水厂分布

Tab.1 Distribution of sewage treatment plants in the investigation scope

流域	城市	污水处理厂数量/座
太湖及周边	上海、无锡、常州、太仓、嘉兴	48
海河	天津、唐山	15
滇池	昆明	7
巢湖	合肥	10
三峡库区及上游	重庆	20
辽河	赤峰	6

2 污泥处理现状分析

2.1 污泥脱水

2.1.1 应用现状

在调研范围内,污泥脱水方式主要包括带式压滤、离心和板框压滤脱水。

① 带式压滤脱水与离心脱水

60%的污水厂污泥采用带式压滤脱水,32%的污水厂采用离心脱水。然而,采用带式压滤脱水的污泥量仅占总污泥量的32%,而离心脱水的污泥量所占比例高达61%,这是由于离心脱水在中大型污水厂中应用较多的缘故。采用离心脱水的污水厂平均污水处理规模为 $31.75\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,平均污泥产量为 36.08 tDS/d ,而采用带式压滤脱水的污水厂平均规模仅为 $7.37\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,平均污泥产量为 7.21 tDS/d 。所有污水厂污泥带式压滤和离心脱水均采

用阳离子PAM作为絮凝剂,带式压滤脱水平均药剂投加量为 4.37 kg/tDS ,脱水污泥含水率为73.06%~82.50%;离心脱水平均药剂投加量为 5.42 kg/tDS ,脱水污泥含水率为68.50%~79.30%,离心脱水药剂投加量高于带式压滤脱水,而脱水污泥含水率更低。

② 板框压滤深度脱水

约8%的污水厂采用板框压滤深度脱水,调理方式主要为化学调理,药剂包括PAM、钙盐(氢氧化钙/氧化钙)、铁盐(三氯化铁/聚合硫酸铁)、铝盐(三氯化铝/聚合氯化铝),不同工程药剂投加比例相差较大,即使同一工程不同季节药剂投加比例也会有显著的波动,其原因可能有两方面:a. 冬春季节污泥有机物含量较高,脱水困难;b. 冬春季节气温较低,不利于絮凝剂发挥作用。

调研发现,污泥板框压滤脱水泥饼含水率一般可降至60%以下,处置方式包括填埋、电厂协同焚烧和水泥窑协同处置等。污泥深度脱水设施工程投资约8~10万元/($\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)(以80%含水率污泥计,下同),处理成本约80~120元/t,其中药剂成本约20~30元/t。

2.1.2 存在问题

近年来污泥板框压滤深度脱水技术在我国得到了越来越多的应用,调理药剂主要为氧化钙、三氯化铁、聚合氯化铝等,药剂投加量占污泥干质量的30%~50%,一方面导致脱水泥饼干质量大幅增加,减量化效果有限;另一方面显著改变了污泥的pH、盐分、电导率等理化指标,不利于资源化利用。此外,添加石灰调理后污泥呈强碱性,调理和压滤环节氨气等臭气组分极易散逸,脱水车间除臭问题亟需重视。

2.2 厌氧消化

2.2.1 应用现状

我国自“九五”期间开始推广污泥厌氧消化技术,在“十一五”和“十二五”期间陆续颁布了多项政策和指南,鼓励城镇污水厂采用厌氧消化工艺进行污泥稳定化。目前,国内已建成污泥厌氧消化工程70余项。在本次调研的重点流域城市中,上海、天津、重庆、昆明等地均建有污泥厌氧消化设施,污泥总处理能力达 262.5 tDS/d ,占重点流域城市污泥总量的11.66%。

对我国部分典型污泥厌氧消化工程的工艺参

数进行了总结分析,具体结果如表2所示。表2中的数据主要来自设计文件、参考文献^[2-6]和运行资料

等,各工程均采用中温厌氧消化工艺,消化温度为33~42℃。

表2 典型污泥厌氧消化工程工艺参数

Tab.2 Process parameters of typical sludge anaerobic digestion project

项 目	镇江污泥工程	襄阳鱼梁洲污泥工程	大连夏家河污泥工程	昆明某污泥工程	上海白龙港污泥工程	郑州王新庄污泥工程	青岛麦岛污泥工程
设计处理规模	污泥 40 tDS/d, 餐厨垃圾 140 t/d	污泥 60 tDS/d	污泥 120 tDS/d, 餐厨垃圾 200 t/d	污泥 100 tDS/d	污泥 204 tDS/d	污泥 66 tDS/d	污泥 54 tDS/d
预处理方式	热水解	热水解	无	中温预反应	无	无	无
消化进泥含固率/%	8~12	11	10	15	5	4	4
进泥有机物含量/%	受餐厨垃圾比例影响大	40~60	受餐厨垃圾比例影响大	50	53	50~70	>65
运行温度/℃	38±1	38~42	35±1	33~35	33~35	35±1	35±2
停留时间/d	25~30	15~18	22~25	22.5	24~25	24	22~23
容积沼气产率/(m ³ ·m ⁻³ ·d ⁻¹)	1.78	0.8~1.0	1.12~1.20	1.54	0.45	0.50	0.59
搅拌方式	机械搅拌+消化液循环	机械搅拌	机械+水射	机械搅拌	机械搅拌	沼气搅拌	机械搅拌
脱硫方式	湿式-干式串联	不详	干式脱硫	湿式+生物+干式串联	湿式-干式串联	干式脱硫	浓缩污泥添加 FeCl ₃
沼气用途	市政压缩天然气	部分供热,部分提纯后作为压缩天然气	市政压缩天然气	污泥干化热源	消化池加热保温和污泥干化	市政压缩天然气	沼气发电

镇江和襄阳工程采用了高温热水解预处理,镇江和大连工程中污泥与餐厨垃圾协同厌氧消化。单位体积池容沼气产率与物料含固率、有机物含量、停留时间等因素有关。上海、青岛、郑州厌氧消化工程污泥含固率均不超过5%,单位体积池容沼气产率为0.45~0.59 m³/(m³·d);昆明、镇江、大连、襄阳工程采用高含固厌氧消化,沼气产率为0.80~1.78 m³/(m³·d)。襄阳污泥有机物含量仅40%~60%,沼气产率也明显低于同样采用基于热水解的厌氧消化工艺的镇江污泥工程,后者污泥与餐厨垃圾协同厌氧消化,单位体积池容沼气产率高达1.78 m³/(m³·d)。大部分工程沼气净化采用干式脱硫,或者干式、生物、湿式脱硫组合工艺,净化后沼气主要用于消化池加热、污泥干化、发电以及提纯压缩天然气对外出售。

2.2.2 存在问题

① 污泥有机物含量低、砂含量高,制约系统高效稳定运行。由于雨污合流、基建施工等问题,大量泥砂排入污水管网,而我国污水厂的沉砂池除

砂效果普遍欠佳,导致污泥有机物含量低、砂含量高。国外污泥有机物含量约为60%~70%,而我国仅为30%~60%,一方面导致厌氧消化沼气产率偏低,经济效益差;另一方面大量砂在消化池内沉积、板结,不仅降低有效池容,影响设施稳定运行,还会加剧设备磨损。

② 污泥资源化利用出路缺乏,制约厌氧消化综合效益。一方面,部分污泥厌氧消化后仍然无法满足土地利用等泥质标准要求,存在病原菌超标、散发臭味、有机酸烧苗、易结块等问题。另一方面,由于缺乏稳定的资源化消纳途径和消纳容量,大部分污泥厌氧消化后仍然采用填埋方式处置,制约了厌氧消化综合效益的发挥。

2.3 好氧发酵

2.3.1 应用现状

好氧发酵为我国污泥处理污染防治最佳可行技术之一。调研范围中,好氧发酵处理污泥量为188.87 tDS/d,占重点流域污泥总量的比例为8.39%。约88.19%的发酵产物进行土地利用(园林

绿化、土地改良等),剩余的 11.81% 填埋处置。

对我国部分典型污泥好氧发酵工艺概况进行了调研分析,结果见表 3。表 3 中各好氧发酵工程进泥均为脱水污泥,含水率为 74%~85%,有机物含量为 30%~65%,重金属指标基本符合泥质标准要求。

常用辅料包括稻壳、秸秆、锯末(木屑)、木块、花生壳、稻草等,辅料添加质量占污泥质量的 0~20%。返混料一般为陈化后的发酵产物,也有部分工程发酵产物未经陈化直接返混,或添加菌种而无需返混。

表 3 典型污泥好氧发酵项目工艺概况

Tab.3 Process overview of typical sludge aerobic fermentation project

项 目	工艺类型与发酵时间	物料运行方式	发酵堆体结构形式	供氧方式	反应温度/℃	发酵温度
UTM 超高温生物干化技术	一次发酵,12~15 d	间歇动态发酵	槽式	移堆/强制通风	85	超高温
污泥固态膜覆盖高温好氧发酵工艺	一次发酵,12 d;二次发酵,12 d	静态发酵	槽式/膜覆盖	强制通风	55~65	高温
CTB 智能控制好氧发酵	一次发酵,20 d	间歇动态发酵	槽式	翻抛/强制通风	55	高温
IPS 好氧生物干化工艺	一次发酵,21 d	间歇动态发酵	槽式	强制抽风	50~80	高温
槽式高温好氧发酵	一次发酵,21 d	间歇动态发酵	槽式	翻抛/强制通风	55~70	高温
全机械化隧道仓好氧堆肥工艺(SACT 工艺,双层)	一次发酵,14~16 d;二次发酵,20 d	间歇动态发酵	仓式	强制通风	60	高温
槽式高温好氧发酵工艺	一次发酵,15 d;二次发酵,15 d	间歇动态发酵	槽式	强制通风	>50	高温
SACT 污泥动态好氧仓式发酵工艺	一次发酵,15~18 d;二次发酵,15~20 d	间歇动态发酵	槽式	翻抛/强制通风	60	高温
传统条垛式动态发酵	一次发酵+陈化,45 d	间歇动态发酵	条垛式	翻抛	55	高温

污泥好氧发酵设备包括配料设备、供氧设备、除臭设备等。大部分工程设置有单独的配料机、投料机、布料机等,也有部分工程以铲车替代。供氧设备包括翻抛机、铲车等,以及罗茨风机、离心风机等强制通风或强制抽风设备。大多数工程设有除臭设施,以生物滤池应用最多。此外,还有喷淋除臭、离子除臭等方式。部分工程设有造粒机后处理设备。

以国内 8 座污泥贮存、物料混合、强制通风曝气、除臭等环节齐全的好氧发酵工程为对象,对其建设与运行成本以及占地面积进行分析。好氧发酵工程规模为 120~1 000 t/d,单位工程总投资为 21~36 万元/(t·d⁻¹),运行成本为 79~200 元/t,包括辅料费、电费、人工费、设备维修费等,其中辅料费占运行成本的比例约为 50%,辅料费、电费、人工费之和占运行成本的比例约为 80%~90%。刘洪涛等^[7]进行敏感性分析发现,辅料成本对运行成本的影响最大,其次是电费和人工费用。因此,合理控制辅料种类和用量、优化曝气和除臭模式、提高设备自动化水平对降低运行成本具有重要意义。

2.3.2 存在问题

目前我国已建成的污泥好氧发酵工程,系统完善程度参差不齐,运行管理水平差异较大。部分工程臭气收集处理环节缺失,或者运行维护较为粗放,极易产生二次污染,且稳定化效果难以保障,亟需提高好氧发酵系统完善程度、设备自动化程度和管理精细化程度。

此外,调研发现部分污泥好氧发酵过程中辅料添加质量为污泥质量的 20% 左右,辅料体积为污泥体积的 100%。大量的辅料添加不仅增加了运行费用,还导致发酵产物体积大幅升高,增加了后续处置成本。

再者,部分污泥好氧发酵后,由于缺乏稳定的土地利用消纳途径和消纳容量,长期堆置或者填埋处置,影响了好氧发酵的环境和经济效益。

2.4 干化焚烧

2.4.1 应用现状

我国现有政策鼓励经济较为发达的大中城市采用污泥焚烧工艺。调研范围内,采用焚烧方式处置的污泥量达到 412.01 tDS/d,占重点流域污泥总量的 18.31%。污泥焚烧方式主要包括单独焚烧、电厂协同焚烧和垃圾协同焚烧,其中电厂协同焚烧处理污泥量所占比例最高,其次是污泥单独焚烧。

污泥单独焚烧工程通常由干化系统、焚烧系

统、烟气净化系统和公用设备四部分组成,干化机包括流化床干化机、圆盘干化机、薄层干化机、桨叶干化机、带式干化机等,焚烧炉常用流化床。例如,某污泥干化焚烧工程设计处理规模为64 tDS/d,干化系统采用流化床干化机,热量来自焚烧系统,干化后污泥含水率<10%;焚烧系统采用热载体流化床焚烧炉,炉温在850℃以上,需要补充少量燃煤;烟气净化系统由半干法喷淋塔和布袋除尘装置两部分组成,主要进行酸性气体的脱除和颗粒物的捕集。

污泥电厂协同焚烧无需另建焚烧炉,且干化所需热量可以利用原炉低品位、廉价余热,以降低工程投资和处理成本。例如,某污泥资源化利用项目设计处理规模为410 tDS/d,污泥来自市政、印染、纺织、化纤、皮革等行业近300家企业,进厂污泥含水率70%~80%,采用超圆盘干化机,出泥含水率35%~42%;干化污泥与煤混合,进入循环流化床焚烧;干化机尾气进行冷凝,冷凝废水处理达标后排放,未凝结气体由风机送入焚烧炉处理。

2.4.2 存在问题

由于我国污泥含砂量高,干化焚烧过程中普遍存在设备磨损问题。例如,某污水厂污泥含砂量达到22.4%,而欧洲仅为6%~8%。污泥对流化床干化机中管式热交换器、螺旋分离器以及給料分配器的内壁磨损严重。运行统计发现,设备磨损原因所导致的停车检修次数占停车总次数的50%左右,而流化床干化机换热器内的导热油盘管因磨损漏油造成的停车又是检修的重点和难点,严重影响系统的稳定运行。

此外,我国大部分污泥焚烧方式为电厂协同焚烧,烟气污染控制问题亟需重视。电厂烟气处理主要侧重于除尘和脱硫脱硝,并不完全适用于污泥焚烧烟气污染控制。掺烧污泥后,烟气含水率升高,烟气量显著增加,导致烟气在高温段的停留时间缩短,影响二噁英等污染物的控制效果;此外,污泥与燃煤的着火温度和燃尽时间迥异,且污泥粒径小,高气体流速条件下部分未燃尽污泥颗粒(包括未降解污染物)更易离开高温区;再者,燃煤烟气量是污泥产生烟气量的2~3倍,污泥焚烧所产生的污染物存在稀释排放的隐患。

3 污泥处置现状分析

调研范围内污泥主要处置方式包括:土地利

用、填埋、建材利用和焚烧,不同方式处置污泥量所占比例如图1所示。填埋仍然是我国重点流域最主要的污泥处置方式,所占比例高达53.79%,焚烧和建材利用所占比例分别为18.31%和16.08%,土地利用所占比例仅为11.01%。值得注意的是,部分污泥处置方式虽然归为填埋和土地利用,但存在随意、无序处置现象,伴随产生二次污染风险。

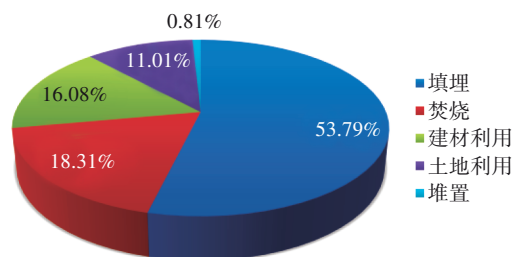


图1 我国重点流域不同污泥处置方式所占比例

Fig.1 Proportion of different sludge disposal methods in China's key river basins

我国与国外发达国家污泥处置方式对比情况如图2所示。

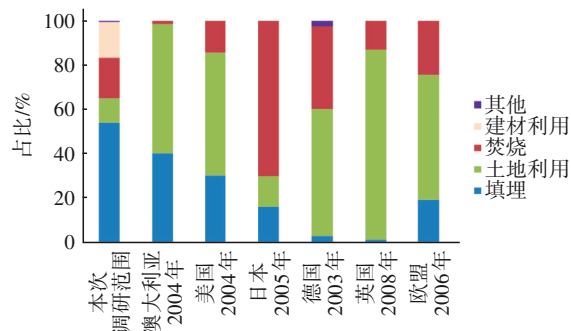


图2 各国污泥处置方式对比

Fig.2 Comparison of sludge disposal methods in various countries

在填埋方面,我国重点流域污泥填埋比例仍然远高于国外发达国家。德国禁止对有机物含量>3%的材料进行填埋,填埋对象主要是焚烧灰渣;日本填埋对象主要为焚烧灰渣或者高温熔化后的惰性熔渣。而我国污泥主要在生活垃圾填埋场进行混合填埋,填埋前通常仅进行脱水处理,污泥含水率和有机物含量均较高,渗滤液和填埋气产量大,占地面积大,且存在环境和安全隐患。

在土地利用方面,我国污泥土地利用比例仅为11.01%,而澳大利亚、美国、德国、英国等国家污泥土地利用比例均超过50%。我国重点流域污泥土地利用比例偏低,原因可能有两方面:①我国污泥

中重金属等污染物含量整体高于国外发达国家,政府监管部门和社会公众对污泥土地利用的环境健康风险存在较多顾虑;②我国尚未建立与污泥土地利用相关的实施、监管、监测指导细则,污泥土地利用缺乏可操作性。

在焚烧方面,我国污泥焚烧方式主要为电厂协同焚烧,单独焚烧所占比例较小,而德国和日本均以单独焚烧为主,其中德国单独焚烧比例达到 59%。目前我国尚无污泥混烧、掺烧方面的法律法规或标准规范,污泥电厂协同焚烧缺乏科学的监管和规范。火电厂对烟气中污染物的监测和处理主要侧重于二氧化硫、氮氧化物、烟尘浓度等,缺乏针对污泥烟气污染物特点的控制措施,且由于污泥掺烧比例相对较小,存在污染物稀释排放的潜在环境隐患。

在建材利用方面,我国重点流域污泥建材利用方式主要为水泥窑协同处置和制砖,少部分用于烧制陶粒。国外发达国家污泥建材利用的对象主要是焚烧灰渣,例如 2005 年日本 70% 的污泥进行焚烧,64% 的灰渣经再生处理后作为建筑材料。而我国大部分污泥建材利用前仅进行机械脱水,污泥含水率和有机物含量高,且含有碱金属氧化物(Na_2O 、 K_2O 等),直接用于制砖或者制陶粒,不仅影响建材质量,还存在二次污染风险。

4 污泥处理处置技术路线分析

调研范围内重点流域城市污泥处理处置技术路线概况见表 4。

基于填埋处置方式的技术路线主要有厌氧消化+干化+填埋、厌氧消化+深度脱水+填埋、好氧发酵+填埋、石灰稳定+填埋、脱水/深度脱水+填埋等。大部分污泥填埋前仅进行了带式脱水、离心脱水或者板框压滤深度脱水处理;部分城市建设有厌氧消化、好氧发酵等设施,但由于污泥稳定化程度达不到土地利用标准,或者由于土地利用出路受阻,污泥仍然进行填埋。

基于焚烧处置方式的技术路线主要有热干化+单独焚烧、热干化+垃圾协同焚烧、脱水/深度脱水+热干化/太阳能干化+电厂协同焚烧、脱水/深度脱水+电厂协同焚烧等。大部分污泥焚烧前采用了热干化或太阳能干化处理,以提高入炉污泥热值;部分污泥采用板框压滤深度脱水处理,将污泥含水率降至 60% 左右;少部分将带式压滤或离心脱水后含

水率 80% 左右的污泥直接入炉掺烧。

表 4 2014 年重点流域污泥处理处置技术路线概况
Tab.4 Overview of sludge treatment and disposal technology routes in key river basins in 2014

项目	技术路线	处理污泥量/(tDS·d ⁻¹)	处理处置污泥比例/%
填埋	厌氧消化+干化+填埋	64.00	2.85
	厌氧消化+深度脱水+填埋	185.50	8.24
	好氧发酵+填埋	22.30	0.99
	石灰稳定+填埋	5.00	0.22
	脱水/深度脱水+填埋	933.85	41.49
焚烧	热干化+单独焚烧	26.00	1.16
	热干化+垃圾协同焚烧	4.45	0.20
	脱水/深度脱水+热干化/太阳能干化+电厂协同焚烧	259.44	11.53
	脱水/深度脱水+电厂协同焚烧	122.12	5.42
	脱水+干化+水泥窑协同处置	31.33	1.39
建材利用	脱水/深度脱水+水泥窑协同处置	130.76	5.81
	脱水/深度脱水+制砖/制陶粒	199.79	8.88
土地利用	好氧发酵+土地利用	166.57	7.40
	厌氧消化+脱水+土地利用	13.00	0.58
	生物沥浸+深度脱水+土地利用	19.53	0.87
	自然干化+土地利用	45.02	2.00
	脱水+土地利用	3.80	0.16
堆置	好氧发酵+堆置	14.20	0.63
	脱水+堆置	4.10	0.18

基于建材利用的技术路线主要有脱水+干化+水泥窑协同处置、脱水/深度脱水+水泥窑协同处置、脱水/深度脱水+制砖/制陶粒等,建材利用处置污泥所占比例为 16.08%,主要采用水泥窑协同处置、制砖、制陶粒,利用前主要处理方式机械脱水或者干化。

基于土地利用的技术路线主要有好氧发酵+土地利用、厌氧消化+脱水+土地利用、生物沥浸+深度脱水+土地利用、自然干化+土地利用、脱水+土地利用等,大部分污泥土地利用前进行好氧发酵或者厌氧消化稳定化处理,部分污泥深度脱水或者自然干化后进行土地利用,少部分污泥脱水后直接土地利用。

5 污泥处理处置发展趋势展望

近年来,随着我国产业结构调整和环境治理力度的加强,污水处理厂进水中的工业废水比例逐渐减小,污泥中重金属含量日益降低^[8],而有机物则呈

现逐渐增加趋势。据调查,2003年我国城市污泥有机物含量平均值为38.4%^[9],2008年污泥有机物含量增加至41.1%^[10],而2014年本次调查范围内污泥有机物含量平均值进一步提高至50.4%,污泥热值也相应增加。污泥处理在以往项目运行经验的基础上,更注重处置与处理的有机衔接,更注重减量化与无害化,污泥焚烧比例逐渐增加,而填埋比例显著降低。

郝晓地等^[11]基于能量衡算以及投资与运行成本匡算,认为污泥干化焚烧乃污泥处理/处置终极方式,且能使灰分磷回收变得更加有效。近年来污泥干化焚烧技术路线在国内也得到了日益广泛的工程应用。例如,上海白龙港污泥干化焚烧工程设计处理规模为486 tDS/d,采用“脱水+干化+单独焚烧”的处理工艺,利用余热锅炉回收污泥焚烧的热量,产生的蒸汽用于污泥干化,烟气处理采用SNCR(炉内)/静电除尘/干式反应器/活性炭喷射/布袋除尘/湿式脱酸/烟气再热/物理吸附工艺,之后通过烟囱排入大气^[12];上海石洞口污水处理厂污泥处理二期工程采用离心脱水+干化+单独焚烧的工艺技术路线,设置有2条污泥干化线及3条焚烧线,着力实现片区污泥全量、稳定、高效的处理处置^[13]。

6 讨论

基于调研,对我国污泥处理处置发展方向提出如下建议:

① 源头与末端控制并重,建立泥质数据库

结合排污许可、污水排入城市下水道水质标准等管理制度,加强对城镇污水厂进水中重金属和其他有毒有害物质的监管和控制,从源头减少污泥中污染物含量。同时,强化对城镇排水管网泥砂的控制,通过管理手段或者工程措施降低污泥含砂量。此外,对污泥中有机质含量、含砂量、热值、重金属等指标进行长期监测,建立泥质数据库,为污泥的科学处理处置提供技术支撑。

② 问题与质量导向并举,坚持绿色循环低碳

以解决城市污泥处理处置现有问题、满足污泥处理处置迫切需求为基本要求,以提高污泥“减量化、稳定化、无害化、资源化”水平,满足环境保护和环境质量改善需求为长远目标,在充分考虑城市特点、污泥产量、泥质特性的基础上,积极采用新工艺、新技术、新材料和新设备,提高污泥处理工程的

技术水平和先进性,减少污泥处理过程中化学药剂消耗、温室气体排放以及环境二次污染,并充分利用污泥中的生物质能源和营养物。

③ 处理与处置充分衔接,加强精细化管理

结合城市总体规划以及产业布局、园林绿化、环境保护专业规划,因城施策,因地制宜,合理选择污泥处置出路和消纳方式,科学确定污泥处理处置技术路线,实现污泥处理与处置的充分衔接。此外,秉持精细化管理的理念,注重运行管理经验的积累,注重污泥处理处置设施运行数据的总结,并根据不同季节污泥性质及泥量变化,调整运行方式和参数,最大限度地发挥污泥处理处置设施的处理能力,降低污泥处理处置过程的能耗和药耗。

7 结论

① 我国重点流域污泥处置方式主要包括填埋、焚烧、建材利用和土地利用。填埋所占比例为53.79%,主要与生活垃圾混合填埋;焚烧所占比例为18.31%,以电厂协同焚烧为主,单独焚烧所占比例较低;建材利用所占比例为16.08%,主要方式为制水泥和制砖;土地利用所占比例为11.01%,处置方式主要为园林绿化和土地改良。

② 基于调研,对我国污泥处理处置发展提出如下建议:源头与末端控制并重,建立泥质数据库;问题与质量导向并举,坚持绿色循环低碳;处理与处置充分衔接,加强精细化管理。

参考文献:

- [1] 张辰,王逸贤,谭学军,等. 城镇污水处理厂污泥处理稳定标准研究[J]. 给水排水, 2017, 43(9): 137-140.
ZHANG Chen, WANG Yixian, TAN Xuejun, et al. Study on the stabilization standard of sludge treatment in urban sewage treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(9): 137-140 (in Chinese).
- [2] 国家污泥处理处置产业技术创新战略联盟专家委员会. 注重资源利用的污泥处理处置工程实践[J]. 给水排水, 2014, 40(4): 11-16.
National Sludge Treatment and Disposal Industry Technical Innovation Strategic Alliance Expert Committee. Emphasis on the utilization of resources sludge treatment and disposal engineering practice [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(4): 11-16 (in Chinese).
- [3] 陈海,王玥,刘东海. 大连市夏家河污泥处理厂的工

- 艺设计与运行经验[J]. 中国给水排水, 2010, 26(12): 42-44, 47.
- CHEN Hai, WANG Yue, LIU Donghai. Process design and operation experience of Xiajiahe WWTP in Dalian City [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(12): 42-44, 47 (in Chinese).
- [4] 李霞, 李国金, 郭淑琴, 等. 郑州王新庄污水处理厂污泥消化系统设计与运行[J]. 给水排水, 2007, 33(7): 13-16.
- LI Xia, LI Guojin, GUO Shuqin, *et al.* Design and operation of sludge digestion in Wangxinzhuang wastewater treatment plant in Zhengzhou [J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(7): 13-16 (in Chinese).
- [5] 蒋玲燕, 杨彩凤, 胡启源, 等. 白龙港污水处理厂污泥厌氧消化系统的运行分析[J]. 中国给水排水, 2013, 29(9): 33-37.
- JIANG Lingyan, YANG Caifeng, HU Qiyuan, *et al.* Operation analysis of sludge anaerobic digestion system at Bailonggang wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(9): 33-37 (in Chinese).
- [6] 王福浩, 李慧博, 陈晓华. 青岛麦岛污水处理厂的污泥中温消化和热电联产[J]. 中国给水排水, 2012, 28(2): 49-51.
- WANG Fuhao, LI Huibo, CHEN Xiaohua. Mesophilic sludge digestion and heat and power co-generation in Qingdao Maidao WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(2): 49-51 (in Chinese).
- [7] 刘洪涛, 陈同斌, 高定, 等. 智能控制污泥好氧发酵工程的运行成本及其分析[J]. 中国给水排水, 2012, 28(19): 106-108.
- LIU Hongtao, CHEN Tongbin, GAO Ding, *et al.* Analysis on operation cost factors of sewage sludge aerobic composting using intelligent control system [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(19): 106-108 (in Chinese).
- [8] 张辰, 谭学军, 王磊, 等. 我国重点流域城市污泥重金属含量与溯源研究[J]. 给水排水, 2019, 45(2): 53-57.
- ZHANG Chen, TAN Xuejun, WANG Lei, *et al.* Heavy metals concentrations and their traceability in municipal sludge in major river basins of China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(2): 53-57 (in Chinese).
- [9] 李艳霞, 陈同斌, 罗维, 等. 中国城市污泥有机质及养分含量与土地利用[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2464-2470.
- LI Yanxia, CHEN Tongbin, LUO Wei, *et al.* Contents of organic matter and major nutrients and the ecological effect related to land application of sewage sludge in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(11): 2464-2470 (in Chinese).
- [10] 马学文, 翁焕新, 章金骏. 中国城市污泥重金属和养分的区域特性及变化[J]. 中国环境科学, 2011, 31(8): 1306-1313.
- MA Xuewen, WENG Huanxin, ZHANG Jinjun. Regional characteristics and trend of heavy metals and nutrients of sewage sludge in China [J]. China Environmental Science, 2011, 31(8): 1306-1313 (in Chinese).
- [11] 郝晓地, 陈奇, 李季, 等. 污泥干化焚烧乃污泥处理/处置终极方式[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4): 35-42.
- HAO Xiaodi, CHEN Qi, LI Ji, *et al.* Ultimate approach to handle excess sludge: incineration and drying [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4): 35-42 (in Chinese).
- [12] 胡维杰, 邱凤翔, 卢骏营. 上海市白龙港污泥干化焚烧工程工艺设计与思考[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4): 54-58.
- HU Weijie, QIU Fengxiang, LU Junying. Process design and consideration of Shanghai Bailonggang sludge drying and incineration project [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4): 54-58 (in Chinese).
- [13] 胡维杰, 周友飞, 陈汝超, 等. 石洞口污水处理厂污泥干化焚烧二期工程工艺要点解析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(16): 41-47.
- HU Weijie, ZHOU Youfei, CHEN Ruchao, *et al.* Analysis of process design of the sludge drying and incineration project phase II in Shidongkou WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(16): 41-47 (in Chinese).

作者简介: 谭学军(1975-), 男, 吉林省吉林市人, 博士, 教授级高级工程师, 从事环境工程领域的技术研发工作。

E-mail: tanxuejun@smedi.com

收稿日期: 2020-04-07

修回日期: 2020-04-13

(编辑: 丁彩娟)