

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.12.049

长江经济带典型城市多源污泥协同建材 利用集成技术路线研究

金宁奔, 谭学军, 吕永鹏, 刘战广, 赵水钎, 王卫刚

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 长江经济带典型城市多源污泥协同建材利用技术路线集成为“长江大保护”水生态环境修复提供重要技术支撑。基于市政污泥、河湖底泥、通沟污泥、工程泥浆等四种污泥含水率、有机质含量、热值、重金属含量等特征分析并进行了属性分类,筛选并分析了厌氧消化+脱水、脱水/干化、脱水/干化+焚烧等污泥协同处理技术路线的技术参数、成本等,以及制砖、制水泥、制陶粒、制工程用土等污泥协同建材利用技术路线的污染风险、成本等,同时结合多源污泥泥质来源稳定性分析,进行了多源污泥协同建材利用泥质与处理工艺参数、处理工艺和资源化工艺经济适配性分析,最终提出了多源污泥协同建材利用集成技术路线。

关键词: 多源污泥;协同;建材利用;集成技术路线

中图分类号: X703

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)12-0193-05

0 引言

十八大以来,党中央、国务院将长江经济带发展上升到国家战略,并将“修复长江生态环境摆在压倒性位置”。随着沿江城市“厂网河(湖)岸”全要素水环境治理工作的开展,污水厂污泥、管渠污泥、河湖底泥、工程泥浆等市政污泥量大大增加。据统计,长江经济带九省二市污泥产量占全国污水厂污泥产量比重超过 1/3^[1]。长期以来,市政污泥产生量大、来源复杂、资源利用率低、存在二次污染风险,现有处置技术仅注重单一物料,缺乏适用可靠的多源污泥协同处置顶层规划,安全处置问题一直没得到有效解决^[2],亟需开展多源污泥协同处置技术集成路线研究,为长江经济带城市水环境保护提供科技支撑。

1 多源污泥特征分析与属性分类

1.1 四种污泥特征分析

(1)市政污泥

分析了长江经济带典型城市 11 座污水处理厂 29 个污泥样品中主要有机质及重金属浓度,发现市

政污泥的 pH 范围为 6.20~7.86,满足《水泥熟料生产用泥质(CJ/T 314—2009)》、《制砖用泥质(GB/T 25031—2010)》和《混合填埋(覆盖土)(GB/T 23485—2009)》三项标准对 pH 指标要求。市政污泥中有机质含量普遍偏低,有机质含量超过 50%的仅 1 座,有机质含量超过 40%的仅 14 座(占比低于 50%)。另外还有 7 座污水处理厂污泥有机质含量低于 30%。污泥重金属浓度除了个别样品中重金属 Cr、Ni 均分别超过标准《水泥熟料生产用泥质(CJ/T 314—2009)》、《制砖用泥质(GB/T 25031—2010)》和《混合填埋(覆盖土)(GB/T 23485—2009)》对应指标限值外,且均未达到 3 倍限值,其余样品所有重金属检测指标均满足上述三项标准中对于制备水泥熟料、制砖和制备覆盖土用泥质需求。

(2)河湖底泥

从 2020 年 9 月至 2021 年 3 月,针对长江经济带典型城市包括芜湖、九江、镇江、六安、武汉等城市河湖底泥进行采样(共 41 个样品)并检测分析,发现河湖底泥的 pH 范围为 6.71~7.75,满足《水泥熟料生产用泥质(CJ/T 314—2009)》、《制砖用泥质(GB/T 25031—2010)》和《混合填埋(覆盖土)(GB/T 23485—2009)》三项标准对 pH 指标要求。河湖底泥的含水率波动较大(27%~98%),相应的污泥低位热值波动也较大(18~2800 J/g),且均低于污泥单独焚烧对泥质低位热值的要求(大于 3.5 MJ/kg)。河湖底

收稿日期: 2023-06-02

基金项目: 国家重点研发计划资助(2020YFC1908700、2021YFC3200700);上海市“科技创新行动计划”启明星培育(扬帆专项)(22YF1444600)

作者简介: 金宁奔(1990—),男,博士,高级工程师,从事固废处理与处置及资源化研究工作。

泥的有机质含量均较低,在 1.9%~16.0%之间,远低于污泥厌氧消化对有机质含量需求(大于 40%)。河湖底泥重金属浓度除了个别样品中重金属 Hg 超过标准《制砖用泥质(GB/T 25031—2010)》对应指标限值外,且未达到 3 倍限值,其余样品所有重金属检测指标均满足《水泥熟料生产用泥质(CJ/T 314—2009)》、《制砖用泥质(GB/T 25031—2010)》和《混合填埋(覆盖土)(GB/T 23485—2009)》三项标准中对于制备水泥熟料、制砖和制备覆盖土用泥质需求。

(3) 通沟污泥

从 2020 年 9 月至 2021 年 3 月,针对长江经济带典型城市包括芜湖、九江、镇江、六安、武汉等城市管网中通沟底泥进行现场采样(共 59 个样品)并检测分析,发现通沟污泥的 pH 范围为 6.04~8.25,满足《水泥熟料生产用泥质(CJ/T 314—2009)》、《制砖用泥质(GB/T 25031—2010)》和《混合填埋(覆盖土)(GB/T 23485—2009)》三项标准对 pH 指标要求。通沟污泥的含水率波动极大(6%~99%),相应的污泥低位热值波动也极大(6~31 600 J/g),其中污泥样品低位热值满足污泥单独焚烧对泥质低位热值的要求(大于 3.5 MJ/kg)占比仅约 24%。通沟污泥的有机质含量波动极大,在 0.8%~99.7%之间,其中有机质含量超过 40%样品量占比仅约 32%。通沟污泥重金属浓度除个别样品中重金属 Pb、Hg 均分别超过标准《制砖用泥质(GB/T 25031—2010)》、重金属 Ni 超过标准《水泥熟料生产用泥质(CJ/T 314—2009)》、《制砖用泥质(GB/T 25031—2010)》和《混合填埋(覆盖土)(GB/T 23485—2009)》对应指标限值外,且均未达到 3 倍限值,其余样品所有重金属检测指标均满足上述三项标准中对于制备水泥熟料、制砖和制备覆盖土用泥质需求。此外,通沟污泥中挥发酚和总氰化物等有机污染物浓度均满足上述三项标准要求。

(4) 工程泥浆

针对长江经济带典型城市包括长沙、上饶、杭州、宁波等城市以及其他南北方大城市如深圳、郑州等工程泥浆进行采样(共 11 个样品)并检测分析,发现工程泥浆的 pH 范围为 7.96~9.75,满足《水泥熟料生产用泥质(CJ/T 314—2009)》、《制砖用泥质(GB/T 25031—2010)》和《混合填埋(覆盖土)(GB/T 23485—2009)》三项标准对 pH 指标要求。工程泥浆的含水率波动极大(17%~98%),有机质含量波动也较大,在 2.20%~17.33%之间,远低于污泥厌氧消化对有机质含量需求(大于 40%)。所有工程泥浆样品

中重金属浓度检测指标均满足《水泥熟料生产用泥质(CJ/T 314—2009)》、《制砖用泥质(GB/T 25031—2010)》和《混合填埋(覆盖土)(GB/T 23485—2009)》三项标准中对于制备水泥熟料、制砖和制备覆盖土用泥质需求,且远低于相应指标限值。

1.2 焚烧灰理化特性

污泥焚烧灰样品中 P₂O₅ 含量高达 18%(见表 1),而 SiO₂ 含量也达到近 40%。若该焚烧灰直接代替部分水泥生料进行掺烧,由于焚烧灰较高的磷含量,水泥产品(GB/T 175—2007)的抗压强度、硅酸三钙含量等主要性能指标将会受到极大不利影响^[3];如作为普通烧结砖(GB/T 5101—2017)、烧结多孔砖(GB/T 13544—2011)、烧结空心砖头(GB/T 13545—2014),将直接影响其抗压强度^[4-5]。

表 1 上海市某污水处理厂污泥焚烧灰 XRF 化学组成分析 单位:%

化学组成	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	CuO	ZnO
污泥焚烧灰	39.9	10.0	13.0	10.9	18.1	4.79	0.136	0.479

污泥焚烧灰除含 P 量较高外,其重金属浸出毒性也是重点关注指标。污泥焚烧灰样品浸出毒性检测结果见表 2 和表 3,结果显示污泥焚烧灰样品中的锌,铜,铬,铅,铍,钡,镍,银,硒,砷,汞,氟的浸出毒性检测结果均未超过《GB-5085—2007 危险废物鉴别标准》标准。

表 2 上海市某污水处理厂污泥焚烧灰旋风灰浸出毒性

危害成分	检出限/(mg·L ⁻¹)	含量/(mg·L ⁻¹)	限值/(mg·L ⁻¹)
Zn	0.002 1	0.046	100
Cu	0.001 2	0.005 9	100
Cd	0.000 27	0.000 40	1
Pb	0.000 63	N.D	5
Cr	0.000 49	0.003 9	15
Be	0.000 30	N.D	0.02
Ba	0.000 52	0.022	100
Ni	0.000 36	0.002 7	5
Ag	0.000 44	N.D	5
Se	0.000 25	0.44	1
As	0.000 40	0.18	5
Hg	0.000 89	0.084	0.1
氟化物	0.52	21.9	100
氧化铍		0.000 55	
CdSO ₄		0.000 42	
CoSO ₄		0.002 5	0.1
Ni ₂ S		0.008 7	
致癌性物质总量		0.012	
Pb ₃ (PO ₃) ₂		0.012	0.5
累计毒性		0.39	1.00

表 3 上海市某污水处理厂污泥焚烧布袋灰样品浸出毒性检测结果

危害成分	检出限/(mg·L ⁻¹)	含量/(mg·L ⁻¹)	限值/(mg·L ⁻¹)
Zn	0.002 1	0.058	100
Cu	0.001 2	0.032	100
Cd	0.000 27	0.000 43	1
Pb	0.000 63	0.000 72	5
Cr	0.000 49	0.004 6	15
Be	0.000 30	N.D	0.02
Ba	0.000 52	0.027	100
Ni	0.000 36	0.030	5
Ag	0.000 44	N.D	5
Se	0.000 25	0.87	1
As	0.000 40	0.28	5
Hg	0.000 89	0.059	0.1
氟化物	0.52	58.9	100
氧化铍		0.000 55	
CdSO ₄		0.000 42	
CoSO ₄		0.002 5	0.1
Ni ₂ S		0.008 7	
致癌性物质总量		0.012	
Pb ₃ (PO ₃) ₂		0.012	0.5
累计毒性		0.39	1.00

1.3 污泥属性分类

通过市政污泥、河湖底泥、通沟污泥和工程泥浆四种污泥理化特征分析可知,市政污泥和部分通沟污泥(有机组分)中有机质含量相对较高,部分污泥有机质含量可达 40%以上,且部分污泥低位热值亦可达 3.5 MJ/kg 以上;河湖底泥、部分通沟污泥(无机组分)和工程泥浆中有机质含量较低,污泥有机质含量均低于 40%,污泥低位热值均未达到 3.5 MJ/kg。

四种污泥中重金属除了极个别检测样品出现 Cr、Ni、Pb 和 Hg 分别超过标准《水泥熟料生产用泥质(CJ/T 314—2009)》、《制砖用泥质(GB/T 25031—2010)》和《混合填埋(覆盖土)(GB/T 23485—2009)》对应指标限值外,其余样品所有重金属检测指标均满足上述三项标准中对于制备水泥熟料、制砖和制备覆盖土用泥质需求,且个别超标值均未达到 3 倍限值,且污泥焚烧灰中重金属浸出毒性均未超过《GB-5085—2007 危险废物鉴别标准》标准。另外,污泥中挥发酚和总氰化物等有机污染物指标值均满足相应标准对制备水泥熟料、制砖和制备覆盖土泥质需求。

2 多源污泥协同处理技术路线比选

基于市政污泥、河湖底泥、通沟污泥和工程泥浆

等多源污泥中有机质和低位热值检测与对标分析,多源污泥建材利用前期协同处理工艺需泥质满足相关性能要求外,还需考虑工艺自身的经济性。

厌氧消化+脱水工艺投资成本和生产成本均较适中,且厌氧工艺种类较多,但工艺本身对污泥有机质含量(大于 40%)、污泥产量和泥质稳定性等均有要求。脱水/干化工艺投资成本和生产成本尤其是投资成本相对较低,且对污泥属性和量质稳定性方面要求不高。脱水/干化+焚烧处理工艺投资成本和生产成本均较高,且对污泥热值(大于 3.5 MJ/kg)、污泥产量和泥质稳定性等均有要求。

因此,当多源污泥有机质含量超过 40%或低位热值超过 3.5 MJ/kg、产量和泥质较稳定时,且经济条件允许情况下,可选择厌氧消化+脱水、脱水/干化+焚烧以及两者组合处理工艺;当多源污泥量质不稳定,亦或经济条件有限情况下,可选择直接脱水/干化工艺进行处理后以备后续建材资源化利用。

3 多源污泥协同建材利用技术路线比选

通过市政污泥、河湖底泥、通沟污泥和工程泥浆等多源污泥中重金属和有机污染物检测与对标分析,以及污泥焚烧灰重金属检出毒性的检测和对标分析,并结合标准《水泥熟料生产用泥质(CJ/T 314—2009)》、《制砖用泥质(GB/T 25031—2010)》和《混合填埋(覆盖土)(GB/T 23485—2009)》等分别对于污泥制备水泥熟料、制砖和制备覆盖土用泥质其他相关指标需求分析,可以得出多源污泥经过前期厌氧、焚烧、脱水、干化等若干工艺或组合工艺处理后,通过多源污泥用于制备建材的掺比及配比控制,有效避免污泥制备建材中重金属超标问题,可实现上述多源污泥协同用于制备水泥熟料、砖和覆盖土等建材。

多源污泥协同建材利用除了工艺上需满足相关标准对于泥质性能要求外,还需考虑工艺自身的经济性。

制免烧砖/水泥/陶粒/工程用土等建材资源化工艺投资成本(小于 10 万元/t)和生产成本(基本不超过 100 元/t)均较低,而制烧结砖工艺投资成本(大于 10 万元/t)和生产成本(基本在 100 元/t 以上)均较高,且各工艺对污泥含水率和掺比均有一定的要求。

因此,基于控制多源污泥掺比和通过前期处理降低污泥含水率情况下,当经济条件允许时,可根据

当地是否配套水泥窑、砖窑等设施选择制水泥、烧结砖等工艺或制陶粒、工程用土、免烧砖等工艺;当经济条件有限时,可根据当地是否配套水泥窑设施选择制水泥工艺或制陶粒、工程用土、免烧砖等工艺。

4 多源污泥协同建材利用技术路线集成

4.1 多源污泥处理与资源化技术路线适配性分析

(1)处理技术适配性分析

多源污泥协同处理工艺适配性分析主要以污泥性质和工艺参数匹配为主,并结合工艺经济性进行分析,见表 4。

表 4 污泥协同处理单位投资和生产成本汇总

序号	工艺	投资成本 / (万元·t ⁻¹)	生产成本 / (元·t ⁻¹)
1	厌氧消化 + 脱水	17 ~ 84	63 ~ 438
1.1	常规厌氧 + 脱水	17 ~ 77	63 ~ 272
1.2	高固厌氧 + 脱水	60 ~ 80	173 ~ 324
1.3	热水解 + 高固厌氧 + 脱水	63 ~ 84	234 ~ 438
2	脱水 / 干化	22 ~ 58	309 ~ 598
2.1	脱水	2 ~ 18	51 ~ 207
2.2	干化	20 ~ 40	258 ~ 391
3	脱水 / 干化 + 焚烧	42 ~ 178	475 ~ 963
3.1	脱水 / 干化 + 独立焚烧	72 ~ 178	475 ~ 963
3.2	脱水 / 干化 + 协同焚烧	42 ~ 98	479 ~ 898

注:成本计算以含水率为 80% 的污泥为基准,投资和生产成本均包括相应工艺所有环节。

从多源污泥属性和工艺参数匹配衔接角度分析,可以得出市政污泥和部分通沟污泥(有机组分)中有机质含量和低位热值均相对较高,可用于协同厌氧或脱水 / 干化后焚烧处理以备后续协同制备建材;河湖底泥、部分通沟污泥(无机组分)和工程泥浆中有机质含量和低位热值均较低,可直接协同脱水 / 干化后用于后续协同制备建材。

基于多源污泥属性和工艺参数匹配衔接角度分析,从多源污泥协同处理工艺经济性角度分析,可以得出直接脱水 / 干化处理工艺的一次性投资成本相对较低(基本不超过 50 万元 / t),生产成本适中(基本不超过 500 元 / t),适用于河湖底泥、部分通沟污泥(无机组分)和工程泥浆等产量不连续、泥质泥量波动范围大、有机质含量和热值低的污泥;脱水 / 干化 + (协同)焚烧处理工艺的一次性投资成本相对较高(基本超过 50 万元 / t),生产成本较高(基本在 500 元 / t 以上),适用于以市政污泥为主、以及部分通沟污泥(有机组分)等产量连续、泥质泥量相对稳

定、有机质含量和热值较高的污泥(部分工艺需要依赖其他配套设施)。此外,尽管厌氧消化 + 脱水处理工艺的一次性投资成本和生产成本均较适中,然而由于工艺本身对泥质要求使其仅适用于以市政污泥为主、以及部分通沟污泥(有机组分)等产量连续、泥质泥量相对稳定、有机质含量较高的污泥。

(2)资源化技术适配性分析

鉴于多源污泥协同建材资源化工艺对污泥性能要求可通过污泥掺比和配比调整,多源污泥协同处理后建材利用工艺适配性分析主要以经济性分析为主,见表 5。

表 5 污泥制建材产品单位投资和生产成本汇总

序号	工艺	投资成本 / (万元·t ⁻¹)	生产成本 / (元·t ⁻¹)	产品收入 / (元·t ⁻¹)	净成本 / (元·t ⁻¹)
1	制砖	3 ~ 40	65 ~ 317	94 ~ 110	-29 ~ 217
1.1	烧结砖	40	245 ~ 317	110	145 ~ 217
1.2	免烧砖	3	65	94	-29
2	制水泥	7	50 ~ 62	50 ~ 55	0 ~ 7
3	制陶粒	9	100	160	-60
4	制工程用土	1 ~ 3	100	10	90

注:成本计算以含水率为 80% 的污泥为基准。

制水泥 / 陶粒 / 工程用土 / 免烧砖等建材资源化工艺的一次性投资成本相对较低(小于 10 万元 / t),生产成本适中(基本不超过 100 元 / t),不仅适用于河湖底泥、部分通沟污泥(无机组分)和工程泥浆等产量不连续的污泥(部分工艺需要依赖其他配套设施),也适用于以市政污泥为主、以及部分通沟污泥(有机组分)等产量连续、泥质泥量相对稳定的污泥;制烧结砖工艺的一次性投资成本相对较高(大于 10 万元 / t),生产成本较高(基本在 100 元 / t 以上),适用于以市政污泥为主、以及部分通沟污泥(有机组分)等产量连续、泥质泥量相对稳定的污泥。

(3)处理与资源化技术路线适配性分析

鉴于市政污泥和部分通沟污泥(有机组分)量质稳定和泥质属性,适用处理工艺和建材资源化工艺可视经济条件和配套设施条件确定;而河湖底泥、部分通沟污泥(无机组分)和工程泥浆由于泥质属性受限和量质不稳定性,适用处理工艺和建材资源化工艺均以经济高效的技术路线为主,并综合考虑配套设施条件。

4.2 多源污泥协同建材利用技术路线集成

基于上述适配性分析,梳理总结几条适用多源污泥协同建材利用集成技术路线:(1)针对市政污泥

和部分通沟污泥(有机组分),当经济条件允许时,可选择“(高温热水解)+(厌氧消化)+(深度)脱水/干化+((协同)焚烧)+制砖/水泥/陶粒/(工程用土)”的技术集成路线;当经济条件有限时,未经稳定化处理的污泥可通过适当降低资源化利用效率,选择“(深度)脱水/干化+制免烧砖/陶粒/水泥/(工程用土)”的技术集成路线。(2)针对河湖底泥、部分通沟污泥(无机组分)和工程泥浆,采用“(深度)脱水/干化+制免烧砖/水泥/陶粒/工程用土”的技术集成路线。此外,当具备水泥窑、砖窑、电厂、垃圾焚烧厂等配套设施时,可选择包括协同焚烧、制水泥/烧结砖等的技术集成路线;当不具备水泥窑、砖窑、电厂、垃圾焚烧厂等配套设施时,可选择包括独立焚烧、制免烧砖/陶粒/工程用土等的集成技术路线。

5 结 论

基于上述四种污泥含水率、有机质含量、热值、重金属含量等特征分析并进行属性分类,筛选并分析了厌氧消化+脱水、脱水/干化、脱水/干化+焚烧等污泥协同处理技术路线的技术参数、成本等,以及制砖、制水泥、制陶粒、制工程用土等污泥协同建材利用技术路线的污染风险、成本等,同时结合多源

污泥泥质泥量来源稳定性分析,进行了多源污泥协同建材利用泥质与处理工艺参数、处理工艺和资源化工艺经济适配性分析,最终提出了多源污泥协同建材利用集成技术路线:

(1)针对市政污泥和部分通沟污泥(有机组分),当经济条件允许时,可选择“(高温热水解)+(厌氧消化)+(深度)脱水/干化+((协同)焚烧)+制砖/水泥/陶粒/(工程用土)”的技术集成路线;当经济条件有限时,可适当选择“(深度)脱水/干化+制免烧砖/陶粒/水泥/(工程用土)”的技术集成路线。

(2)针对河湖底泥、部分通沟污泥(无机组分)和工程泥浆,采用“(深度)脱水/干化+制免烧砖/水泥/陶粒/工程用土”的技术集成路线。

参考文献:

[1] 王先恺,董滨,高勇,等.污泥生物处理技术在长江大保护中的应用前景[J].环境科学研究,2020,33(5):1241-1246.
[2] 戴晓虎.我国污泥处理处置现状及发展趋势[J].科学,2020,72(6):30-34.
[3] 贺烽,高永健,樵献兰,等.含磷石灰岩矿的特征及其对水泥生产的影响[J].水泥工程,2014(2):4-7,72.
[4] 黄榜彪,张向华,朱基珍,等.污泥掺量对烧结污泥页岩砖抗压强度的影响[J].四川建材,2012,38(5):3-4.
[5] 林子增,王军,张林生.城市污泥为掺料烧结砖的生产性试验研究[J].环境工程学报,2009,3(10):1875-1878.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com