

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.10.005

南宁市污泥处理处置工艺分析及展望

许 谦, 蒋才芳, 何志健, 贝德光
(广西绿城水务股份有限公司, 广西 南宁 530031)

摘要: 从南宁市生活污水处理厂污泥泥质出发,详细论述了南宁市选择好氧堆肥、水泥窑协同焚烧、污泥焚烧制取轻质陶粒工艺处理处置污泥的原因,并分析了各处理处置方式的特点,对产生的问题提出了解决办法。好氧堆肥的主要优点在于建设投资省、建设周期短、技术门槛低,可以短时间内建成,同时存在产生臭气、占地大、无法接收石灰调理污泥及产品监管的问题;水泥窑协同焚烧具有显著的污泥减量化、重金属固化、污泥循环利用并减少水泥窑脱硝成本等优势,但同样存在技术门槛较高、能耗高、检修时间较长的问题;烧制陶粒具有掺烧比大、技术门槛低、易于建成的特点,但也存在对污泥的属性有要求以及需要试烧的问题。因此,要彻底解决污泥围城的问题,必须走多产业协同的道路,做到资源互补。

关键词: 污泥处理处置; 好氧堆肥; 水泥窑协同焚烧; 轻质陶粒; 产业协同

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)10-0031-07

Analysis and Prospect of Urban Sludge Treatment and Disposal Process in Nanning City

XU Qian, JIANG Cai-fang, HE Zhi-jian, BEI De-guang
(Guangxi Nanning Water Co. Ltd., Nanning 530031, China)

Abstract: Based on the sludge characteristics analysis of Nanning municipal sewage treatment plant, the reasons for the selection of aerobic composting, cement kiln co-incineration and sludge incineration to produce light ceramsite were discussed. The characteristics of various treatment methods were analyzed and the solutions to the problems were put forward. Low construction investment, short construction period and low technical threshold, which can be built in a short time are the main advantages of aerobic composting. However, there are still some problems such as odor, large land occupation, no acceptance for sludge conditioning by lime and difficult supervision of products. The co-incineration of cement kilns has significant advantages in sludge reduction, heavy metal solidification, sludge recycling and the cost reduction of cement kiln denitration. But long maintenance time, high technical threshold and high energy consumption are the main obstacles for its application. The fired ceramsite has the superiority of large blending ratio, low technical threshold and easy to build. But the requirements of sludge properties standard and trial firing are still the problem to fix. Therefore, we must take multi-industry cooperation and achieve resource complementarity to completely solve the problem of sludge in light ceramsite production.

基金项目: 广西创新驱动发展专项资金项目(桂科AA18118013)

通信作者: 蒋才芳 E-mail: 279030802@qq.com

Key words: sludge treatment and disposal; aerobic composting; cement kiln co-incineration; light ceramsite; industrial synergy

1 南宁市污泥处理处置现状

1.1 污水及污泥产量

南宁市城区及下辖4县运营污水处理厂共计9座,分别为城区的埌东污水处理厂($35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、江南污水处理厂($72 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、五象污水处理厂($5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)及三塘污水处理厂($8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、武鸣污水处理厂($5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),及下辖县的上林污水处理厂($0.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、马山污水处理厂($0.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、宾阳污水处理厂($2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、横县污水处理厂($2 \times$

$10^4 \text{ m}^3/\text{d}$);试运行污水处理厂4座,分别为那平江水质净化厂($10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、茅桥水质净化厂($10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、朝阳溪水质净化厂($10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、物流园水质净化厂($4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$);在建污水处理厂1座,为仙葫水质净化厂($4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)。

南宁市及下辖县各主要污水厂2016年—2020年污水及污泥产量见表1(污泥产量均以含水率80%计,60%含水率均已反算为80%含水率,下同)。

表1 南宁市及下辖县各主要污水厂2016年—2020年污水、污泥产量

Tab.1 Sludge output of main sewage treatment plants in Nanning urban and its counties from 2016 to 2020

项 目	2016年		2017年		2018年		2019年		2020年	
	污水处理量/ 10^4 m^3	污泥产量/t	污水处理量/ 10^4 m^3	污泥产量/t	污水处理量/ 10^4 m^3	污泥产量/t	污水处理量/ 10^4 m^3	污泥产量/t	污水处理量/ 10^4 m^3	污泥产量/t
埌东污水处理厂	11 760	42 265	11 907	66 068	12 900	51 275	13 332	61 752	12 242	73 457
江南污水处理厂	18 568	114 241	19 160	77 533	20 218	69 131	20 559	85 337	25 781	95 872
三塘污水处理厂					488	1 562	1 294	7 507	939	4 132
五象污水处理厂							556	779	1 382	7 463
武鸣污水处理厂	1 338	3 078	1 402	5 007	1 395	6 979	1 343	10 747	1 416	10 909
马山污水处理厂	231	532	276	692	310	931	307	1 045	315	1 008
上林污水处理厂	219	328	168	252	199	299	205	390	252	505
宾阳污水处理厂	744	1 935	787	1 740	782	2 427	771	2 391	803	2 409
横县污水处理厂	623	1 433	691	1 777	728	1 747	721	1 443	721	1 442

由表1可知,自2018年以来,污水处理量占南宁市污水处理总量90%的江南、埌东污水厂污水处理量及污泥产量不断增加,2021年试运行的4座污水处理厂也将陆续正式投入运行,对南宁市污泥处理处置能力提出了更高要求。

1.2 污泥处理处置现状

受地理位置、产业结构及地方政策的影响,南宁市污泥处理方式主要有水泥窑协同焚烧、好氧堆肥及烧制陶粒三种方式。

① 水泥窑协同焚烧,制水泥

南宁市周边分布着大量以石灰石为主要成分的山脉,为水泥行业的蓬勃发展提供了先决条件。据统计,南宁市周边水泥生产企业的水泥熟料日生产能力达 $4.72 \times 10^4 \text{ t}$ (仅统计熟料产能 $4 000 \text{ t/d}$ 以上的生产线),为水泥窑协同处置城市污泥提供了便利。广西壮族自治区政府2014年7月出台《关于开

展利用水泥窑协同处置垃圾废弃物的指导意见》,提出要在全自治区推行水泥窑协同处置垃圾废弃物技术,以 $2 000 \text{ t/d}$ 以上新型干法水泥生产线为依托,将生活污水处理厂的污泥收集转运至水泥厂,利用水泥窑生产线进行处理处置^[1]。

② 好氧堆肥,产品用于林地及土地复垦

南宁市地处亚热带地区,耕地面积1 008万亩(1亩=666.7 m^2 ,下同),林地1 650万亩,此外还有大量因矿山开采和速生桉种植等产生的砂土地、废弃矿区的贫瘠土地,通过好氧堆肥工艺制取的营养土可以用于改良砂土地和废弃矿区,实现贫瘠土地复垦、园林绿化、林地利用。广西住房和城乡建设厅于2015年8月颁布实施了《广西城镇污水处理厂污泥产物土地利用技术规范》(DBJ/T 45—003—2015),鼓励符合标准、风险可控的污泥产物进行土地利用,尤其是用于林地、土地改良和园林绿化,并

规定地方人民政府应优先采购符合国家和广西相关土地利用标准的污泥产物和衍生产品。

③ 污泥作为原料烧制陶粒

陶粒具有强度高、密度低、隔声降噪、导热难、抗收缩性、表面粗糙多孔、比表面积大等优点,在建筑材料、水处理、吸声材料、园艺基质等方面的应用前景广阔^[2-3]。按制备原料不同,陶粒可分为黏土陶粒、页岩陶粒和粉煤灰陶粒等,其中黏土和页岩属于不可再生资源,国家已出台相关政策禁止开采或限制开采^[2-3],因此利用污泥制备轻质陶粒是实现污泥资源化利用的重要方式之一,可广泛应用于建筑、水处理等领域^[3]。得益于南宁市迅速发展的建筑行业,陶粒在南宁有着广泛的应用渠道。

2021年1月—4月,江南、埌东、三塘等8座污水厂的污泥处理处置情况见表2。

由表2可知,南宁市现阶段污泥处理处置以焚烧为主,好氧堆肥制取营养土为辅,水泥窑协同焚烧、制取陶粒、好氧堆肥三者占总污泥处理比例为41%、38%、21%。

表3 2020年南宁市城区主要污水处理厂污泥泥质

Tab.3 Sludge quality of main sewage treatment plants in Nanning urban area in 2020

检测项目	埌东污水厂一期	埌东污水厂二期	江南污水厂一期	江南污水厂二期	江南污水厂三期	武鸣污水厂	三塘污水厂	五象污水厂
含水率/%	77.30	78	76.58	78.5	67.8	77.5	78.9	74.4
总氮/(g·kg ⁻¹)	43.3	48.8	24.1	35.8	35.7	60.5	29.2	9.1
总磷/(g·kg ⁻¹)	17.7	21.4	16.8	16.0	16.0	26.9	14.4	4.75
总钾/(g·kg ⁻¹)	14.6	10.2	12.2	10.4	8.7	6.5	10.9	1.8
总铜/(mg·kg ⁻¹)	98.5	103	187	206	116	219	83.2	136
总铝/(mg·kg ⁻¹)	2 440	1 061	2 210	2 130	2 050	1 040	2 031	1 980
总镉/(mg·kg ⁻¹)	1.01	1.35	2.06	2.11	0.572	1.83	1.31	<0.83
总铬/(mg·kg ⁻¹)	248	193	238	183	113	95.6	203	56
总铅/(mg·kg ⁻¹)	23.4	25.4	106	50.2	44.4	22.1	22.9	32.6
总汞/(mg·kg ⁻¹)	2.80	2.48	3.43	4.37	3.73	1.28	1.89	1.34
总锌/(mg·kg ⁻¹)	357	461	702	858	224	970	387	462
总砷/(mg·kg ⁻¹)	18.4	11.8	21.5	23.5	16.9	20.3	19.2	<16.7
总镍/(mg·kg ⁻¹)	22.8	26.3	45.4	58.3	28.3	52.3	40.4	30.6
有机质/%	45.9	56.7	37.1	43.1	45.9	67.9	36.9	21
低位发热量/(MJ·kg ⁻¹)	7.21		5.98			13.32	3.4	

我国针对城镇污水厂污泥的各类处理处置方式制定了一系列泥质标准,分别有园林绿化、林地、土地改良、农用、混合填埋、制砖、焚烧等,不同的处理处置途径对污泥泥质的要求不同,通过表3所列数据,可得出以下结论:

表2 2021年1月—4月南宁市主要污水厂污泥处理处置情况

Tab.2 Sludge treatment and disposal status of main sewage treatment plants in Nanning from January to April 2021

项 目	好氧堆肥	水泥窑协同焚烧	制陶粒
江南污水处理厂	2 538.96	2 187.8	21 841.2
埌东污水处理厂	3 074.04	18 020.2	
三塘污水处理厂	3 187.39		
武鸣污水处理厂	1 122.68	3 102.26	
马山污水处理厂	320.22		
上林污水处理厂	336.73		
横县污水处理厂	710.70		
宾阳污水处理厂	747.38		
合计	12 038.10	23 310.26	21 841.2

2 南宁市污水污泥处理处置方式特点分析

2.1 污泥性质

污泥泥质对处理处置方式的选择具有较为重要的参考作用,2020年南宁市各城区污水处理厂污泥泥质见表3。

① 近几年,随着污水管网提质增效工作的推进,除建设于新区的五象污水厂污水管网相对不完善外,其他污水厂的有机质含量明显增大,由2017年的24%~32%增加到现在的36.9%~67.9%,满足各污泥处理处置方式对有机质含量的需求限制。

② 污泥的重金属指标远低于限值,满足各污泥处理处置方式的要求。

③ 除三塘、五象污水厂外,埌东、江南、武鸣污水厂污泥的低位热值均符合单独焚烧中的各种焚烧模式要求。

④ 除五象污水厂外,污泥营养值均符合农用及园林绿化用泥质指标要求(30 g/kg以上),所有污水厂污泥营养值均符合土壤改良用泥质要求。

2.2 南宁市污泥处理处置工艺分析

2.2.1 水泥窑协同处置

南宁市城市污泥主要利用华润水泥(南宁)有限公司(以下简称华润水泥公司)两条日产量3 000 t/d(单条日最大处理污泥量150 t/d)及红狮水泥(南宁)有限公司(以下简称红狮水泥公司)日产量4 500 t/d(日最大处理污泥量300 t/d)的水泥熟料生产线进行污泥协同处置。

与水泥窑生产相关联的污泥成分属性见表4。

表4 与水泥窑生产相关联的污泥成分

Tab.4 Sludge composition cement kiln correlation %

检测项目	埌东污水厂一期	埌东污水厂二期	江南污水厂一期	江南污水厂二期	江南污水厂三期	武鸣污水厂	三塘污水厂
SiO ₂	24.6	36.8	33.9	32.7	32.8	18.4	40.3
Al ₂ O ₃	6.82	5.70	7.32	7.25	7.20	6.82	8.72
Fe ₂ O ₃	2.95	3.94	5.03	5.01	10.3	2.95	4.94
CaO	2.80	1.75	2.01	1.87	0.27	2.80	0.83
MgO	0.50	0.77	0.74	0.71	0.25	0.50	0.40

由表4可知,污泥成分中的SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃等物质更接近于水泥窑生料的黏土类成分(SiO₂>30%、Al₂O₃>25%),理论上能替代部分黏土类辅料。但若将80%含水率污泥直接投入分解炉,将掺烧比控制在生料量的3%~5%(实时调控),而污泥中的水分占80%,有机物又占干质量的40%左右,这些成分将在高温中完全蒸发或分解,剩下可用作原料的无机物几乎可以忽略不计,所以采用水泥窑协同处置污泥基本不会考虑原料的替代,而更为重视污泥对水泥熟料质量的影响。如果考虑原料的替代,自来水厂沉淀及反冲洗所产生的污泥可能更为适合。

南宁市华润和红狮两家水泥厂在焚烧污泥时各有其特点,主要表现在污泥的干化及污泥的投加点上。

① 华润水泥公司污泥协同焚烧特点

华润水泥公司采用污泥直烧工艺,污泥投加点点设置在水泥窑分解窑。该工艺较干化后焚烧工艺减少了干化段,同时也避免了污泥干化过程中带来的臭气及废水问题,并能利用污泥中的氨与分解炉中的氮氧化合物反应起到脱硝的作用,从而节省20%~50%的脱硝氨水的投加。

含水率为80%左右的湿污泥首先由泵送入污泥雾化喷枪,在压缩空气的分散(中心风、旋流风、冷却风)作用下被打散进入分解炉焚烧,使污泥燃烧更充分。在实际运行中需要注意两大问题:一是喷枪的雾化分散效果。由于水分高、黏性大,污泥若不能被喷枪有效分散,则掺入后在分解炉内的热交换效率较低,污泥成团将直接掉在烟室缩口而产生结皮,严重影响熟料标煤耗、污泥掺量及窑况。影响喷枪分散效果的主要因素是中心风、旋流风、冷却风“三风”风量,可根据实际工况进行风量调整。针对以上情况,华润水泥公司采取了提高旋流风风压的措施,由设计压力0.5 MPa、风量2 m³/min增加至压力2.94 MPa、风量9.66 m³/min,解决了污泥投加问题。二是污泥远距离输送。80%的含水率污泥进行高扬程远距离的输送会腐蚀输送管及磨损输送泵,为此华润水泥公司开发了污泥润滑技术,对整个输送管道设置6个润滑液输送点,当柱塞泵运行时,润滑系统就自动启动向污泥输送管道注入润滑液,降低管道沿程阻力,避免污泥管道烧结和堵塞,有效减小了运行能耗和管道的腐蚀。

采用80%含水率污泥直接投入分解窑焚烧工艺的水泥厂不多,目前单组水泥窑80%含水率污泥投加量控制在4.8 t/h左右,该投加量对水泥熟料的f-CaO、28 d抗压强度、凝结时间等指标并没有明显影响,按一座水泥窑处理150 t湿泥计,水泥熟料标准煤耗量增加约5 kg/t,电耗增加约1 kW·h/t。该投加方式较为明显的缺点是无法接收含水率明显低于80%的污泥,因为含水率过低导致污泥流动性变差,污泥失去宾汉姆(Bingham)体的特点,致使无法采用泵送喷射入窑的办法进行处理处置。

② 红狮水泥公司污泥协同焚烧特点

与华润水泥公司不同,红狮水泥公司采用污泥先与水泥生料同步干化,然后投入水泥窑的方式进行处理处置。固体废弃物干化后投加点点较多,如分解炉、烟室、上升烟道、窑门、主燃烧室等投加点点,污

水厂污泥一般先采用生料磨粉预烘干,然后烟室投加方式。

与华润水泥公司污泥直烧工艺相比,红狮水泥公司焚烧污泥前先利用立式磨窑一体机对污泥进行干化处理。立式磨窑是较为先进的水泥生料预处理设备,集磨粉、选粉、烘干于一体,污泥与水泥生料按比例混合后经过磨辊与磨盘磨细,进入选粉段,选粉段下部侧面通入热空气,对物料进行烘干,在磨盘的惯性离心力作用下,被粉磨的物料从磨盘边缘逸出,被高速气流扬起到分离器进行分级,粗粉返回磨盘再次磨粉,细粉则被气流带出。立式磨窑一体机主要利用水泥窑 300~500 °C 的余热将混合后的物料含水率降至 3% 左右,再从回转窑尾烟室与生料一起利用固体泵转输后由高压喷枪喷入。

投加前对高含水率的污泥进行预烘干不但可以有效利用水泥窑的余热减少能源的浪费,而且能减少污泥对水泥窑温度的影响,还允许接收不同含水率的污泥,也更有利于水泥窑熟料的品质控制。采用生料磨粉预烘干—烟室投加方式同样对水泥熟料的 f-CaO、28 d 抗压强度、凝结时间等指标没有明显影响。

《水泥窑协同处置固体废物污染控制标准》(GB 30485—2013)详细规定了水泥窑排入大气的各种污染物的限值,从这些年的实际检测数据来看,无论是重金属类、二噁英还是氯化氢及氟化氢的排放量均远低于限值。

2.2.2 污泥焚烧制取陶粒

污泥焚烧制取陶粒是污泥处理处置的一个重要方式,其污泥掺烧比(20%~30%)远高于水泥窑协同焚烧。与水泥窑处置污泥不同,污泥焚烧制取陶粒更多是为了将市政污泥中的 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO 等物质作为烧制陶粒的原料,其中 SiO₂、Al₂O₃ 在高温条件下生成的莫来石等矿物成分,能够保障陶粒的强度,碱性氧化物 Fe₂O₃、CaO、MgO 等则为助溶成分^[3]。一般认为烧制陶粒上述成分的合适范围:SiO₂ 为 48%~65%,Al₂O₃ 为 14%~20%,Fe₂O₃、CaO、MgO 等助溶成分之和为 13%~26%^[3-5]。由表 4 可以看出,江南、埌东及三塘污水厂污泥组分接近于黏土原料成分(SiO₂ 为 24.6%~40.3%,Al₂O₃ 为 5.7%~8.72%,Fe₂O₃、CaO、MgO 等助溶成分之和为 6.17%~10.82%),经过半年试烧,所制轻质陶粒符合国家超轻陶粒和陶砂相关要求。

污泥作为原料制取陶粒有两种主要原料,一是含水率为 55% 左右的市政污泥,放置于堆场并喷洒除臭生物菌剂进行除臭;二是铁矿尾泥,铁矿尾泥主要成分为与污泥类似,也主要是 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO 等成分,但铁泥需要进行除石操作,并将其含水率控制在 40% 以下;两种原料及含硅、铝等辅助材料按照 3:5:2 的比例复配,送入造粒机挤压成陶粒毛坯再送入烘干窑中进行预热烘干,之后进入回转窑进行陶粒的烧制。烧制的陶粒按粒径可分为细、中、粗三种,中、粗者为陶粒,细者为陶砂。采用污泥制取陶粒成品技术指标见表 5。

表 5 污泥制取陶粒指标

Tab.5 Index of ceramsite production from sludge

检测项目	国标技术要求	检测结果
累计筛余/%	37.5 mm 筛孔	0
	31.5 mm 筛孔	0~5
	26.5 mm 筛孔	0~10
	19.0 mm 筛孔	54
	16.0 mm 筛孔	30~70
	9.5 mm 筛孔	93
	4.75 mm 筛孔	95~100
	2.36 mm 筛孔	95~100
密度等级/(kg·m ⁻³)	200~300	234
筒压强度/MPa	≥0.5	0.6
吸水率/%	≤25	23.7
表观密度/(kg·m ⁻³)		384

由表 5 可知,从筒压强度来看,所烧制陶粒均为一等品范畴,说明采用污泥焚烧制取陶粒的办法是可行的,与水泥窑类似,同样具有使有机物彻底分解、二次污染少的特点,但需要特别注意的是,污泥和铁泥混合后需要一定时间的陈化以利于后期的烘干焚烧的膨胀,陈化过程会产生大量臭气,需通过喷洒除臭生物菌剂以及对陈化场所封闭除臭进行改善。

2.2.3 污泥好氧堆肥制取营养土

南宁市城市污泥好氧堆肥主要采用条垛式堆肥,80% 含水率污泥运至堆肥厂后先进行压滤脱水至 60%(60% 含水率污泥无此步骤),然后打碎与有机辅料进行充分混合并投加生物菌种,有机辅料主要采用糖厂滤泥、米糠、秸秆、稻草、城市园林落叶剪枝、粉煤灰或烟粉等,保持 55 °C 高温 3 d 以上,即能充分杀灭病原菌和寄生虫(卵)达到无害化要求^[6-7],堆肥 18 d 后得到含水率约 40% 的土地改良用

营养土。污泥堆肥工艺流程如图 1 所示。

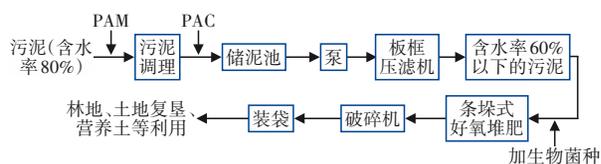


图 1 好氧堆肥工艺流程

Fig.1 Flow chart of aerobic composting process

堆肥后的营养土参数如表 6 所示。

条垛式好氧堆肥需要较长的堆肥时间、较大的堆肥场地,一般项目选址均在城市郊区,在实际堆肥过程中辅料和污泥的配比十分重要^[7],配比不当会直接影响堆肥产品的含水率,而且在堆肥过程中全氮的流失最为严重,南宁市好氧堆肥的全氮流失均在 50% 以上,需投加固氮菌种进行改善^[8]。

表 6 堆肥后营养土参数

Tab.6 Nutrient soil parameters after composting

项目	含水率/%	pH	有机质/%	全氮/%	全磷/%	全钾/%	总养分/%	总汞/(mg·kg ⁻¹)	总砷/(mg·kg ⁻¹)	总铅/(mg·kg ⁻¹)	总镉/(mg·kg ⁻¹)	总铬/(mg·kg ⁻¹)	粪大肠菌群值/(个·g ⁻¹)	蛔虫卵死亡率/%
数值	42.40	7.49	48.80	1.47	1.35	1.13	3.95	0.36	4.01	7.80	0.31	128.00	<0.111	100

注: 营养土参数值为 2020 年全年平均值。

3 污泥处理处置方式经济性分析

污泥均以 80% 含水率计,水泥窑协同焚烧污泥费用为 255 元/t,污泥焚烧制陶粒为 215 元/t,堆肥为 203 元/t;水泥厂、堆肥厂、陶粒厂均在同一地区的产业园内,运费均以 77 元/km 计(好氧堆肥、水泥窑协同焚烧约 102 元/t,焚烧制取陶粒 98 元/t),各污泥处置方式的费用见表 7。

表 7 各处理处置方式成本计算

Tab.7 Cost calculation of each disposal method

元·t⁻¹

项目	处置费用	运费	合计
水泥窑协同焚烧	255.00	102.00	357.00
好氧堆肥	203.00	102.00	305.00
制取陶粒	215.00	98.00	313.00

从处置费用来看,水泥窑协同焚烧成本最高,好氧堆肥成本最低。2020 年南宁市污泥处理处置费用 6 000 ~ 6 500 万元,运输费用约占 1/3,因此降低出厂污泥含水率,也是降低污泥处置费用的重要方式。污泥处置费用计入污水厂成本,污水费用与自来水费用一同征收。

4 结语

① 水泥窑协同焚烧处置污泥技术成熟,其产生的二次污染已能够得到很好的控制,对污泥的属性要求低,可将污泥最大限度地减量化处理,并将重金属固化在水泥熟料晶格中,是污泥无害化、稳定化、减量化及资源化的有效处理处置手段。由于水泥自身特性,水泥窑协同焚烧处置污泥对地方资源依赖性极强,建设周期较长,因此不是每个城市都可以选择采用。水泥窑协同焚烧污泥的掺烧比

受到生料属性、工艺特点、废气排放要求等多重限制,实际污泥处置量一般小于设计污泥处置量,掺烧比基本控制在 3% ~ 5% 之间,若达到规范最大的 8% 掺烧比基本都需要额外增加预干化设备;协同处置对水泥窑熟料整体把控严格,污泥从存储到焚烧全封闭,不存在臭味外逸的问题,但不同的水泥工艺对污泥投加点、投加量、含水率均有不同的要求,需要较高的工艺掌控能力,技术门槛较高,如采用该种方式处理处置污泥,建议尽量选择有长期污泥处理处置经验的华润、红狮、海螺等大型水泥制造企业,特别值得注意的是水泥窑每年均有 14 ~ 28 d 的停产检修期,会停止污泥接收或减少污泥接收量。

② 污泥焚烧制取陶粒掺烧比高,消纳污泥量大,整体技术易把控,但对污泥属性有较高的要求。污泥作为陶粒原料,需要经过一段时间的试烧,才能从产品质量上判断该污水厂污泥是否符合原材料的要求。目前只有江南污水厂污泥最符合制陶要求,陶粒产品受建筑市场供求变化的影响较大。

③ 好氧堆肥工艺具有投资省、建设周期短、接收污泥量大、处置费用少的特点,能够在短时间内建设完毕并开始消纳污泥,但随着国家对好氧堆肥产品的溯源监督及产品去向要求的愈加严格,对使用不当的堆肥产品的处罚力度加大,使得越来越多的污泥生产企业将关注度转向污泥焚烧路径;此外,好氧堆肥受市场销路及季节影响最为明显,无法接收经过石灰调理的污泥,在污泥消纳过程中几乎不可避免地产生臭气。

南宁市未来污泥的处理处置方式应该是多产

业协同的模式,单一产业或多或少受到季节、市场、设备、工艺的影响,解决污泥围城问题必须走多产业协同的道路,既不能只局限于焚烧,也不能局限于土地利用。2020年以来广西绿城水务股份有限公司与火力发电企业多次尝试利用污泥耦合发电,已取得初步成功,下一步将在火力发电厂升级改造后进行污泥处理处置,同时还与广西本地科研院所开展了蚯蚓资源化生物器处置污水厂污泥的实践。

参考文献:

- [1] 杭世珺,关春雨,戴晓虎,等. 污泥水泥窑协同处置现状与展望(上)[J]. 给水排水,2019,45(5):39-43,49. HANG Shijun, GUAN Chunyu, DAI Xiaohu, *et al.* Status and prospect of sludge co-processing in cement kiln(part 1)[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 45(5): 39-43, 49(in Chinese).
- [2] 桑迪,王爱国,孙道胜,等. 利用工业固体废弃物制备烧胀陶粒的研究进展[J]. 材料导报,2016,30(9):110-114. SANG Di, WANG Aiguo, SUN Daosheng, *et al.* Manufacturing sintering-expanded ceramsite from industrial solid wastes [J]. *Materials Review*, 2016, 30(9):110-114(in Chinese).
- [3] 石稳民,黄文海,罗金学,等. 污泥资源化制备轻质陶粒研究进展[J]. 工业用水与废水,2020,51(2):5-10. SHI Wenmin, HUANG Wenhai, LUO Jinxue, *et al.* Research progress of reutilization of sludge for light weight ceramsite manufacturing [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2020, 51(2):5-10(in Chinese).
- [4] 王乐乐,杨鼎宜,刘亚东,等. 轻质污泥陶粒研制及其膨胀机理的探讨[J]. 混凝土,2013(4):40-43. WANG Lele, YANG Dingyi, LIU Yadong, *et al.* Preparation and expansion mechanism of light-weight sludge ceramsite [J]. *Concrete*, 2013 (4) : 40-43 (in Chinese).
- [5] 曲烈,王渊,杨久俊,等. 焙烧温度对污泥陶粒烧胀过程及结构特征的影响[J]. 材料导报,2016,30(6):125-128. QU Lie, WANG Yuan, YANG Jiujun, *et al.* Effect of sintering temperature on expansion process and structure characteristics of sludge ceramsite[J]. *Materials Review*, 2016, 30(6):125-128(in Chinese).
- [6] 曹仲宏,王秀朵. 某城市污水处理厂污泥处理处置方案的选择[J]. 中国给水排水,2013,29(20):13-15. CAO Zhonghong, WANG Xiuduo. Selection of sludge treatment and disposal scheme in a municipal sewage treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(20):13-15(in Chinese).
- [7] 李思敏,赵阳悦,唐锋兵. 辅料配比对市政污泥堆肥效果的影响[J]. 当代化工,2020,49(4):564-567,571. LI Simin, ZHAO Yangyue, TANG Fengbing. Influence of additive ratio on municipal sludge composting effect [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2020, 49(4) : 564-567, 571(in Chinese).
- [8] 李常慧,刘永德,赵继红,等. 城镇污水厂污泥好氧堆肥生产运营中的常见问题及措施[J]. 净水技术,2015,34(2):113-116. LI Changhui, LIU Yongde, ZHAO Jihong, *et al.* Common problems and countermeasures of production and operation for aerobic composting of urban sewage sludge [J]. *Water Purification Technology*, 2015, 34(2) : 113-116(in Chinese).

作者简介:许谦(1982-),男,山东单县人,本科,高级工程师,主要从事给水厂、污水厂运营建设及公司课题研究工作。

E-mail:164898609@qq.com

收稿日期:2021-03-12

修回日期:2021-05-31

(编辑:丁彩娟)