

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.10.005

武汉市污水厂污泥处理处置技术碳排放特征对比

贺珊珊¹, 余鑫磊², 陈红芳¹, 宫 铃³, 张碧波¹, 魏晓蓓³,
邹 磊¹, 刘海燕¹, 万年红¹, 杨珊珊²

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 哈尔滨工业大学
城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150009; 3. 武汉市城市排水发展
有限公司, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 以武汉市污泥处理处置工程为基础,梳理了15条不同污泥处理处置路线(土地利用4条、建材利用6条、焚烧利用5条)的碳排放量。研究表明,土地利用碳排放量为366.6~629.5 kgCO₂/tDS、焚烧利用为674.2~1 418.7 kgCO₂/tDS、建材利用为906~2 724.9 kgCO₂/tDS;土地利用技术路线中,采用离心脱水方式可使碳排放量降低102 kgCO₂/tDS,约占净碳排放量的19.33%;建材利用技术路线中,采用板框脱水方式可使碳排放量降低974.5~1 772.3 kgCO₂/tDS,占净碳排放量的101.8%~186.0%;焚烧利用技术路线中,采用板框脱水-热干化工艺可使碳排放量降低184.9~239.2 kgCO₂/tDS,占净碳排放量的25.38%~35.48%。此外,研究还表明,土地利用方式中,肥料产品利用和厌氧消化环节的碳排放量分别占净碳排放量的32.18%~69.06%和107.80%;建材利用过程中,煅烧环节碳排放量占净碳排放量的60.99%~97.84%;焚烧利用方式中,板框脱水碳排放量占净碳排放量的50.71%~54.79%;这些环节碳排放量较高,是碳减排重点。

关键词: 污泥处理处置; 碳排放; 土地利用; 建材利用; 焚烧利用

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)10-0035-07

Comparison of Greenhouse Gas (GHG) Emission Characteristics of Sludge Treatment and Disposal Technologies of Wastewater Treatment Plants in Wuhan

HE Shan-shan¹, YU Xin-lei², CHEN Hong-fang¹, GONG Ling³, ZHANG Bi-bo¹,
WEI Xiao-bei³, ZOU Lei¹, LIU Hai-yan¹, WAN Nian-hong¹, YANG Shan-shan²

(1. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd.,
Wuhan 430010, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150009, China; 3. Wuhan Urban Drainage Development
Co. Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: The greenhouse gas (GHG) emissions of 15 different sludge treatment and disposal pathways were summarized based on the sludge treatment and disposal projects in Wuhan, including 4 for landfill, 6 for building materials utilization, and 5 for incineration utilization. The GHG emissions of each technology pathway are as follows: 366.6–629.5 kgCO₂/tDS for land utilization technical routes, 674.2–

基金项目: 中国工程院湖北省战略咨询研究项目(HB2021C14); 中国市政中南院科技计划项目(KY-N-S-2022-05)
通信作者: 贺珊珊 E-mail: heshanshan2010@126.com

1 418.7 kgCO₂/tDS for incineration utilization technical routes, 906–2 724.9 kgCO₂/tDS for building material utilization technical routes. Using centrifugal dewatering can reduce 19.33% of net GHG emissions, which is equivalent to 102 kgCO₂/tDS in land utilization technical routes. Frame dewatering can reduce 101.8%–186.0% of net GHG emissions, resulting in 974.5–1 772.3 kgCO₂/tDS in building material utilization technical routes. Using frame dewatering and thermal drying can reduce 25.38%–35.48% of net GHG emissions, nearly 184.9–239.2 kgCO₂/tDS in incineration technical routes. Moreover, the study results reveal that certain processes for sludge treatment and disposal contribute significantly to GHG emissions, including the utilization of fertilizer products and anaerobic digestion in the land utilization technical routes (contributing 32.18% to 69.06% and 107.80% of the net GHG emissions), the calcination stage in the building material utilization technical routes (contributing 60.99% to 97.84% of the net GHG emissions), and frame dewatering in the incineration utilization technical routes (contributing 50.71% to 54.79% of the net GHG emissions). These are the key emission reduction links.

Key words: sludge treatment and disposal; GHG emissions; land utilization; building material utilization; incineration utilization

我国提出的“2030年碳达峰”“2060年碳中和”目标,要求各行各业实现节能降耗、绿色低碳发展。2019年我国碳排放总量为115×10⁸ t,其中污水处理行业碳排放量占总排放量的1%~2%。污泥处理处置过程会消耗大量的药剂和能源,同时也具备回收能源或资源的潜力,从而形成“碳补偿”。因此,在“双碳”背景下对市政污泥进行低碳化、无害化的安全处置是必然趋势。

武汉市现有城镇生活污水处理厂(不含乡镇污水处理厂)28座,总设计规模达到462.5×10⁴ m³/d,其中主城区污水处理规模达到356×10⁴ m³/d,产生污泥约1 600 t/d(以80%含水率计)。如此大量的污泥也形成了丰富多样的处理处置技术,涉及土地利用、建材利用和焚烧利用三大类。为此,针对不同的污泥处理处置技术进行碳排放核算,理清各技术关键工艺环节的碳排放特征,分析各技术的碳减排重点,并提出针对性的减排措施,这对于后续污泥低碳处理处置具有重要的指导意义。

1 武汉市市政污水厂污泥处理处置现状

目前,武汉市城区污水处理厂大多采用AAO、氧化沟及MBR处理工艺,产泥系数为0.5~0.8 kgDS/kgBOD₅。污泥处理采用离心脱水和板框脱水等方式,污泥主要处置途径有土地利用、建材利用(制陶粒、制砖、制水泥)及焚烧利用三种。对武汉市市政污水污泥处理处置技术路线进行统计分析,具体情况如表1所示。

表1 武汉市污泥处理处置技术路线

Tab.1 Technical routes of sludge treatment and disposal in Wuhan

处置类别	技术路线	运输距离/km
土地利用	R1a 离心脱水-好氧堆肥-园林绿化利用	39
	R1b 板框脱水-好氧堆肥-园林绿化利用	13
	R2 离心脱水-热水解厌氧消化-沼气燃料利用/沼渣园林绿化利用	36
	R3 离心脱水-蚯蚓堆肥-园林绿化利用	30
建材利用	R4a 离心脱水-预热-陶粒窑焙烧	9
	R4b 板框脱水-预热-陶粒窑焙烧	25
	R5a 离心脱水-预热-砖窑焙烧	82
	R5b 板框脱水-预热-砖窑焙烧	21
	R6a 离心脱水-水泥窑协同焚烧	26
	R6b 板框脱水-水泥窑协同焚烧	25
焚烧利用	R7a 离心脱水-热干化-热电厂协同焚烧	39
	R7b 板框脱水-热干化-热电厂协同焚烧	13
	ER 离心脱水-热电厂协同焚烧	36
	R8b 板框脱水-热干化-垃圾焚烧厂混烧	30
	R9b 板框脱水-热干化-单独焚烧	9

2 碳排放核算边界及方法

2.1 碳排放核算边界

污泥的全过程碳排放核算包括脱水处理、运输、处置以及资源化产品的使用或废弃物的最终处置。按照碳排放源的类型可以分为直接排放、间接排放和碳补偿。在碳直接排放中,CO₂属于生物源不予考虑,仅考虑污泥处理处置过程中的甲烷和氧化亚氮的排放情况。碳间接排放包含处理处置过程中消耗的电力、蒸汽和药剂等产品的生产过程产

生的碳排放。

碳补偿是指污泥中能源或资源的回收利用、替代化石能源及化工产品等,从而产生的补偿效益。污泥经资源化处理后产生的有机肥、沼气可以分别替代化肥、燃料的碳替代效益;污泥制砖或陶粒则仅考虑其作为替代性的建材原料减少部分原料使用的碳补偿效益;污泥焚烧时则考虑污泥热值提供的能量补偿所产生的碳补偿效益。

2.2 碳排放核算方法

污泥处理处置碳排放主要采用排放因子法,根据IPCC提供的排放因子及部分符合我国国情的排放因子进行计算。涉及的排放公式^[1-6]如下:

$$E_i = M_{i, \text{耗量}} \times EF_i \quad (1)$$

式中: E_i 为第 i 种能源(药剂、电力、热源)消耗碳排放量; $M_{i, \text{耗量}}$ 为第 i 种能源(药剂、电力、热源)消耗量; EF_i 第 i 种能源(药剂、电力、热源)碳排放因子。

$$E_{\text{N}_2\text{O}, \text{堆肥}} = M_{\text{堆肥}} \times F_{\text{N}} \times 1\% \times 30\% \times 265 \quad (2)$$

式中: $E_{\text{N}_2\text{O}, \text{堆肥}}$ 为堆肥释放 N_2O 产生的碳排放量; $M_{\text{堆肥}}$ 为堆肥干污泥质量; F_{N} 为污泥中氮元素含量。

$$E_{\text{CH}_4, \text{堆肥}} = M_{\text{堆肥}} \times F_{\text{C}} \times 20\% \times 0.26\% \times 28 \quad (3)$$

式中: $E_{\text{CH}_4, \text{堆肥}}$ 为堆肥释放 CH_4 产生的碳排放量; F_{C} 为污泥中碳元素含量。

$$E_{\text{N}_2\text{O}, \text{焚烧}} = M_{\text{焚烧}} \times EF_{\text{N}_2\text{O}, \text{焚烧}} \times 265 \quad (4)$$

式中: $E_{\text{N}_2\text{O}, \text{焚烧}}$ 为焚烧释放 N_2O 产生的碳排放量; $M_{\text{焚烧}}$ 为焚烧干污泥质量; $EF_{\text{N}_2\text{O}, \text{焚烧}}$ 为污泥焚烧氧化亚氮排放因子。

$$E_{\text{运输}} = L \times M \times EF_{\text{柴油}} \quad (5)$$

式中: $E_{\text{运输}}$ 为运输过程产生的碳排放量; L 为运输距离; M 为运输油耗; $EF_{\text{柴油}}$ 为柴油碳排放因子。

$$E_{\text{CH}_4, \text{土地}} = M_{\text{肥料}} \times EF_{\text{CH}_4, \text{土地}} \times 28 \quad (6)$$

式中: $E_{\text{CH}_4, \text{土地}}$ 为土地利用释放 CH_4 产生的碳排放量; $M_{\text{肥料}}$ 为堆肥后肥料产量; $EF_{\text{CH}_4, \text{土地}}$ 为土地利用 CH_4 排放因子。

$$E_{\text{N}_2\text{O}, \text{土地}} = M_{\text{肥料}} \times EF_{\text{N}_2\text{O}, \text{土地}} \times 265 \quad (7)$$

式中: $E_{\text{N}_2\text{O}, \text{土地}}$ 为土地利用释放 N_2O 产生的碳排放量; $EF_{\text{N}_2\text{O}, \text{土地}}$ 为土地利用 N_2O 排放因子。

$$E_{\text{灰渣}} = M_{\text{灰渣}} \times 12.5 \times EF_{\text{电}} + M_{\text{灰渣}} \times 1.7 \times EF_{\text{柴油}} \quad (8)$$

式中: $E_{\text{灰渣}}$ 为污泥焚烧灰渣填埋碳排放量; $M_{\text{灰渣}}$ 为污泥焚烧后灰渣的质量; $EF_{\text{电}}$ 为电力碳排放因子。

$$J_{\text{土地利用}} = M_{\text{肥料}} \times EF_j \quad (9)$$

式中: $J_{\text{土地利用}}$ 为污泥肥料的碳减排量; EF_j 为第 j 种肥料碳排放因子。

$$J_{\text{沼气, 电}} = M_{\text{CH}_4} \times EF_{\text{电}} \times 0.95 \times 22.7 \times 22\% / 3.6 \quad (10)$$

式中: $J_{\text{沼气}}$ 为沼气发电产生的碳减排量; M_{CH_4} 为厌氧消化甲烷产量。

$$J_{\text{沼气, 热}} = M_{\text{CH}_4} \times EF_{\text{柴油}} \times 0.95 \times 22.7 \times 51\% / 42.6 \quad (11)$$

式中: $J_{\text{沼气, 热}}$ 为污泥沼气燃烧产生热量的碳减排量。

$$J_{\text{建材}} = M_{\text{替代}} \times EF_{\text{建材}} \quad (12)$$

式中: $J_{\text{建材}}$ 为污泥建材利用的碳减排量; $M_{\text{替代}}$ 为污泥替代建材原料量; $EF_{\text{建材}}$ 为建材碳排放因子。

2.3 排放因子

参考《中国产品全生命周期温室气体排放系数集(2022)》《中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》,以及生态环境部发布的《关于做好2022年企业温室气体排放管理相关重点工作的通知》,污泥处理处置碳排放量核算过程中涉及的数据^[7-12]如表2所示。参考《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)》,污泥处理处置各环节所需的能耗、药耗等参数根据调研结果并结合理论计算获得,具体指标及参数取值^[2,5,12-19]如表3所示。

表2 二氧化碳排放因子

Tab.2 Value of GHG emissions factors

类型	指标	排放因子
能源	煤炭(褐煤)/(kgCO ₂ ·t ⁻¹)	0.107
	天然气/(kgCO ₂ ·MJ ⁻¹)	0.072
	柴油/(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)	3.82
	电力/[kgCO ₂ ·(kW·h) ⁻¹]	0.581
	蒸汽/(kgCO ₂ ·MJ ⁻¹)	0.11
化工产品	PAM/(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)	2.85
	PAC/(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)	1.62
	FeCl ₃ /(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)	1.04
	石灰/(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)	1.11
	活性炭/(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)	9.017
	Fe ₂ O ₃ /(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)	1.6
	NaOH/(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)	1.29
	Ca(OH) ₂ /(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)	0.98
	化肥-氮肥(以N计)/(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)	7.76
	化肥-磷肥(以P ₂ O ₅ 计)/(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)	2.33
	化肥-钾肥(以K ₂ O计)/(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)	0.66
原料	水/(kgCO ₂ ·m ⁻³)	0.21
	建材原料/(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)	0.03
处理过程	土地利用CH ₄ /(kgCH ₄ ·t ⁻¹ DS)	3.18
	土地利用N ₂ O/(kgN ₂ O·t ⁻¹ DS)	0.03
	焚烧N ₂ O/(kgN ₂ O·t ⁻¹ DS)	0.99

表 3 污泥处理处置过程中能源、物料消耗参数

Tab.3 Energy and material consumption parameters in sludge treatment and disposal processes

项目	参数	数值	项目	参数	数值
离心脱水	PAM/(kg·t ⁻¹ DS)	7	污泥制砖	电耗/(kW·h·t ⁻¹ DS)	70
	电耗/(kW·h·t ⁻¹ DS)	45		净热耗(离心脱水) ³ /(MJ·t ⁻¹ DS)	5 998.4(17 331.5)
板框脱水	PAM/(kg·t ⁻¹ DS)	5		建材原料 ² 替代(离心脱水)/(t·t ⁻¹ DS)	0.59(0.73)
	PAC/(kg·t ⁻¹ DS)	175	单独焚烧	污泥热值(离心脱水)/(MJ·kg ⁻¹ DS)	5.48(9.11)
	电耗/(kW·h·t ⁻¹ DS)	100		电耗/(kW·h·t ⁻¹ DS)	200
板框脱水 (用于水泥厂协同焚烧)	CaO/(kg·t ⁻¹ DS)	125		净热耗(离心脱水)/(MJ·t ⁻¹ DS)	-2 071.1(-5 697.6)
	FeCl ₃ /(kg·t ⁻¹ DS)	5		灰渣量(离心脱水)/(t·t ⁻¹ DS)	0.59(0.73)
	PAM/(kg·t ⁻¹ DS)	1.25	热电厂协同焚烧	净热耗(离心脱水)/(MJ·t ⁻¹ DS)	-2 071.1(-5 697.6)
	电耗/(kW·h·t ⁻¹ DS)	100		净热耗(无干化过程)/(MJ·t ⁻¹ DS)	12 479
好氧堆肥	稻壳/(kg·t ⁻¹ DS)	2.34		灰渣量(离心脱水)/(t·t ⁻¹ DS)	0.59(0.73)
	电耗(蚯蚓堆肥)/(kW·h·t ⁻¹ DS)	120(115)		电耗/(kW·h·t ⁻¹ DS)	111
	柴油(蚯蚓堆肥)/(kg·t ⁻¹ DS)	2(0)	垃圾协同焚烧	电耗/(kW·h·t ⁻¹ DS)	125
	肥料产量/(t·t ⁻¹ DS)	2.88		净热耗/(MJ·t ⁻¹ DS)	-2 071.1
餐厨垃圾协同厌氧消化	电耗/(kW·h·t ⁻¹ DS)	224.97	水泥窑协同焚烧	灰渣量(离心脱水)/(t·t ⁻¹ DS)	0.59(0.73)
	蒸汽消耗/(MJ·t ⁻¹ DS)	1 911.11		电耗/(kW·h·t ⁻¹ DS)	250
	PAM/(kg·t ⁻¹ DS)	5.03		热耗 ³ /(MJ·t ⁻¹ DS)	2 071.1
	PAC/(kg·t ⁻¹ DS)	8.21	烟气处理	灰渣量(离心脱水)/(t·t ⁻¹ DS)	0.59(0.73)
	Fe ₂ O ₃ /(kg·m ⁻³ 沼气)	0.76×10 ⁻³		NaOH/(kg·t ⁻¹ DS)	17.86
	CH ₄ 产生量/(m ³ ·t ⁻¹ DS)	11.49		Ca(OH) ₂ /(kg·t ⁻¹ DS)	9.41
污泥制陶粒	肥料产量/(t·t ⁻¹ DS)	1.11	污泥运输	活性炭/(kg·t ⁻¹ DS)	1
	电耗/(kW·h·t ⁻¹ DS)	150		运输距离	见表 1
	净热耗 ¹ (离心脱水)/(MJ·t ⁻¹ DS)	7 074.7(19 810.4)		运输车辆载质量/t	10
污泥干化	建材原料 ² 替代量(离心脱水)/(t·t ⁻¹ DS)	0.59(0.73)		运输车辆油耗/(kg·km ⁻¹)	0.6
	电耗/(kW·h·t ⁻¹ H ₂ O)	50			
	天然气消耗/(kJ·kg ⁻¹ H ₂ O)	3 050			

注：¹污泥制陶粒热耗辅助能源为天然气。²建材原料替代按照替代黏土用量来计算碳减排。³污泥制砖及水泥窑协同焚烧辅助能源为标煤。

3 核算结果

3.1 总体对比

武汉市各污泥处理处置路线净碳排放情况如图 1 所示。

总体来说,武汉市污泥处理处置技术路线中,还未出现“零碳”或“负碳”排放的技术。土地利用类碳排放量为 366.6~629.5 kgCO₂/tDS,属于所有技术路线中最低的类别;焚烧利用类碳排放量为 674.2~1 418.7 kgCO₂/tDS,碳排放量居中;建材利用类碳排放量为 906~2 724.9 kgCO₂/tDS,碳排放量相对最高。

因此,从碳排放的角度考虑,污泥处理处置工艺路线首选土地利用方式,其次为焚烧利用,第三为建材利用。

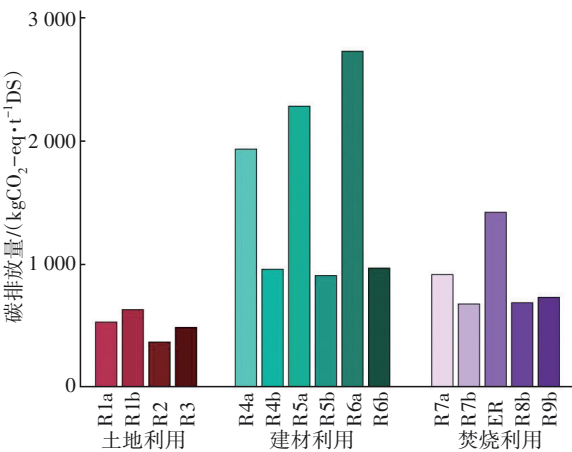


图 1 污泥处理处置路线碳排放量

Fig.1 GHG emissions of sludge treatment and disposal technical routes

3.2 土地利用

土地利用投资小、运行维护简便,是国内外污泥常用的处置方式。英国、西班牙、法国、美国的污泥土地利用处置方式占比超过 50%,我国约 48.5%的地区污泥处理处置以土地利用为主^[20]。以土地利用方式处置污泥时,脱水污泥通常需要结合好氧堆肥和厌氧消化的处理方式。好氧堆肥-土地利用适用于人口密度低、土地资源丰富的地区;厌氧消化-土地利用适用于土地资源丰富和可用于污泥应用的地区。

对土地利用类 4 种技术路线进行碳排放核算,结果见表 4。可以看出,蚯蚓堆肥过程由于不需要电力搅拌,减少了电力和能源的消耗,具有较低的碳排放量。厌氧消化过程由于额外的沼气利用产生了较好的碳汇效应(-138.7 kgCO₂/tDS),具有更低的碳排放量。蚯蚓堆肥较常规好氧堆肥更低碳,而厌氧消化为最低碳的处理方式。

表 4 土地利用中不同工艺环节的碳排放

Tab.4 GHG emissions of different units in land utilization kgCO₂·t⁻¹DS

项目	碳排放量			
	R1a	R1b	R2	R3
脱水	52.8	369.4	52.8	52.8
好氧发酵	109.3	98		
厌氧消化			395.2	
蚯蚓堆肥				88.8
产品使用	364.3	202.6	166.1	334.8
运输	150.2	64.4	43.3	112.9
肥料替代	-149.1	-104.9	-152.1	-103.8
沼气利用			-138.7	
合计	527.5	629.5	366.6	485.5

好氧堆肥和蚯蚓堆肥方式的碳排放主要集中在产品使用环节,在 R1a、R1b 和 R3 路线中的碳排放量分别占总净碳排放量的 69.06%、32.18% 和 68.95%。脱水环节对好氧堆肥的碳排放影响也不容忽视,R1b 路线中板框脱水过程碳排放量占整个净碳排放量的 56%。采用好氧堆肥方式时,R1a 路线的碳排放量较 R1b 路线减少 102 kgCO₂/tDS,约占净碳排放量的 19.33%。厌氧发酵 R2 路线中碳排放主要集中在厌氧消化工艺段,其碳排放量约占总碳排放量的 107.80%。因此,土地利用方式的碳减排应重点关注好氧堆肥的产品使用环节,以及厌氧发酵的厌氧消化环节。

3.3 建材利用

建材利用 6 条技术路线中,碳排放量较低的是 R4b、R5b 和 R6b 路线(见表 5),净碳排放量分别为 957、906、952.6 kgCO₂/tDS。使用板框脱水可使碳排放量降低 974.5~1 772.3 kgCO₂/tDS,约占净碳排放量的 101.8%~186.0%。该路线中产生碳排放的主要工艺段为煅烧环节,其碳排放量占净碳排放量的 60.99%~97.84%。因此,采用建材利用方式处置污泥时,碳减排重点为煅烧工艺段,建材利用的原料替代仅占净碳排放量的 0.65%~2.42%。

表 5 建材利用的碳排放组成

Tab.5 GHG emissions composition by building material utilization kgCO₂·t⁻¹DS

项目	碳排放量					
	R4a	R4b	R5a	R5b	R6a	R6b
脱水	52.8	369.4	52.8	369.4	52.8	205.6
煅烧	1 849.8	589.7	2 231.5	552.6	2 650.9	714.9
运输	46.5	19.8	14	5.9	38.8	54
建材利用	-17.6	-21.9	-17.6	-21.9	-17.6	-21.9
合计	1 931.5	957	2 280.7	906	2 724.9	952.6

3.4 焚烧利用

污泥焚烧技术实现污泥最大程度的减量化,因此我国现有政策鼓励较为发达城市进行污泥焚烧利用。目前,我国污泥焚烧处置量达到 412.01 tDS/d,换算为 80% 含水率的污泥约 2 060 t/d,污泥焚烧成为我国大型城市污泥处理处置的主流工艺之一^[21]。污泥焚烧利用的 5 条工艺路线净碳排放量如表 6 所示。

表 6 焚烧利用的碳排放组成

Tab.6 GHG emissions composition by incineration utilization kgCO₂·t⁻¹DS

项目	碳排放量				
	R7a	R7b	ER	R8b	R9b
脱水	52.8	369.4	52.8	369.4	369.4
热干化	1 018.7	89		89	89
焚烧	-208.8	179.3	1 347.7	187.4	231.0
灰渣填埋	8.1	10.1	8.1	10.1	10.1
运输	42.6	26.4	10.1	29.7	29
合计	913.4	674.2	1 418.7	685.6	728.5

由表 6 可知,污泥前处理对焚烧利用碳排放有显著影响,采用离心脱水方式的 ER 路线碳排放量最高,而采用板框脱水-热干化方式的 R7b、R8b、R9b 路线净碳排放量最低,较离心脱水方式降低

184.9~239.2 kgCO₂/tDS, 占净碳排放量的25.38%~35.48%。由此可见, 采用焚烧方式处置污泥时, 应尽可能采用深度脱水工艺。板框脱水的3条技术路线中, 主要碳排放工艺环节为板框脱水(369.4 kgCO₂/tDS), 占净碳排放量的50.71%~54.79%, 也是碳减排的重点环节。

4 结论

对4条土地利用、6条建材利用、5条焚烧利用污泥处理处置工艺路线进行碳排放核算, 分析比较各技术路线关键工艺环节的碳排放量, 提出绿色低碳的工艺方式, 找出关键的碳减排环节, 具体结论如下:

① 对于土地利用方式的4条工艺路线, 离心脱水-蚯蚓堆肥-土地利用和离心脱水-好氧消化-土地利用较为低碳, 碳排放主要集中在产品使用环节, 是碳减排关注的重点。

② 对于建材利用方式的6条工艺路线, 板框脱水-预热-陶粒窑焙烧、板框脱水-预热-砖窑焙烧和板框脱水-水泥窑协同焚烧技术路线较为低碳, 其中煅烧环节碳排放量占净碳排放量的60.99%~97.84%, 是碳减排的重点工艺环节。

③ 对于焚烧利用方式的5条工艺路线, 板框脱水-热干化-热电协同焚烧、板框脱水-热干化-垃圾混合焚烧较为低碳, 其中板框脱水环节碳排放量占净碳排放量的50.71%~54.79%, 是碳减排的重点。由于污泥前处理对焚烧利用碳排放的影响较大, 因此应尽可能采用深度脱水工艺。

参考文献:

- [1] 李爱民, 李羽志, 宋联, 等. 无锡市典型污泥处理处置全过程碳排放特征研究[J]. 给水排水, 2022, 48(11): 28-34.
- LI Aimin, LI Yuzhi, SONG Lian, *et al.* Carbon emission characteristics of typical sludge treatment and disposal process in Wuxi [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(11): 28-34 (in Chinese).
- [2] HAN Z L, SUN D Z, WANG H, *et al.* Effects of ambient temperature and aeration frequency on emissions of ammonia and greenhouse gases from a sewage sludge aerobic composting plant[J]. Bioresource Technology, 2018, 270: 457-466.
- [3] 王琳, 李德彬, 刘子为, 等. 污泥处理处置路径碳排放分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(5): 2404-2412.
- WANG Lin, LI Debin, LIU Ziwei, *et al.* Analysis on carbon emission from sludge treatment and disposal [J]. China Environmental Science, 2022, 42(5): 2404-2412 (in Chinese).
- [4] 张成. 重庆市城镇污水处理系统碳排放研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- ZHANG Cheng. Study on Carbon Emission of Urban Wastewater Treatment System in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011 (in Chinese).
- [5] 次瀚林, 王先恺, 董滨. 不同污泥干化焚烧技术路线全链条碳足迹分析[J]. 净水技术, 2021, 40(6): 77-82, 99.
- CI Hanlin, WANG Xiankai, DONG Bin. Carbon purification footprint analysis of different sludge drying and incineration processes [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(6): 77-82, 99 (in Chinese).
- [6] 李乔洋. 基于碳减排分析的我国城镇污泥处置现状及发展趋势研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- LI Qiaoyang. Current Situation and Development Trend of Urban Sludge Disposal in China Based on Carbon Emission Reduction Analysis [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021 (in Chinese).
- [7] 王向阳. 污水处理碳足迹核算及环境综合影响评价研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
- WANG Xiangyang. Study on Calculating Carbon Footprint and Assessing the Total Environmental Impact of Wastewater Treatment [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019 (in Chinese).
- [8] 陈舜, 逯非, 王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6371-6383.
- CHEN Shun, LU Fei, WANG Xiaoke. Estimation of greenhouse gases emission factors for China's nitrogen, phosphate, and potash fertilizer [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6371-6383 (in Chinese).
- [9] ZHANG W F, DOU Z X, HE P, *et al.* New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(21): 8375-8380.
- [10] HOSPIDO A, MOREIRA M T, MARTÍN M, *et al.* Environmental evaluation of different treatment processes for sludge from urban wastewater treatments: anaerobic digestion versus thermal processes [J]. The

- International Journal of Life Cycle Assessment, 2005, 10 (5): 336-345.
- [11] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [R]. Switzerland: IPCC, 2019.
- [12] LIU B B, WEI Q, ZHANG B, *et al.* Life cycle GHG emissions of sewage sludge treatment and disposal options in Tai Lake watershed, China[J]. Science of the Total Environment, 2013, 447: 361-369.
- [13] 冯云刚, 徐云辉, 戴明华, 等. 基于PAC+PAM调理的污泥深度脱水工程设计与运行[J]. 中国给水排水, 2020, 36(8): 96-100.
- FENG Yungang, XU Yunhui, DAI Minghua, *et al.* Design and operation of sludge deep dewatering project based on PAC+PAM conditioning [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(8): 96-100 (in Chinese).
- [14] DUME B, HANC A, SVEHLA P, *et al.* Carbon dioxide and methane emissions during the composting and vermicomposting of sewage sludge under the effect of different proportions of straw pellets [J]. Atmosphere, 2021, 12(11): 1380.
- [15] 李寿德, 支楠, 秦仙景. 我国回转窑生产陶粒热耗解析及改进措施[J]. 砖瓦, 2007(5): 39-41.
- LI Shoude, ZHI Nan, QIN Xianjing. Analysis and improvement measures for heat consumption of ceramic granules produced by rotary kilns in China[J]. Bric-tile, 2007(5): 39-41 (in Chinese).
- [16] 孙明华. 城市污泥“两段式”干化及协同焚烧研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- SUN Minghua. Research on Two-stage Drying and Synergetic Incineration of Municipal Sludge[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015 (in Chinese).
- [17] 孟鑫, 陈伟, 陈柏校. 萧山4 000 t/d污泥集中焚烧处理项目实践[J]. 中国给水排水, 2022, 38(8): 127-132.
- MENG Xin, CHEN Wei, CHEN Baixiao. Practice of Xiaoshan 4 000 t/d centralized sludge incineration project [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(8): 127-132 (in Chinese).
- [18] 朱文婷, 韦保仁. 苏州市生活垃圾处理碳足迹核查[J]. 环境科学研究, 2011, 24(7): 828-834.
- ZHU Wenting, WEI Baoren. Carbon footprint calculation for disposal of household solid waste in Suzhou [J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(7): 828-834 (in Chinese).
- [19] 王丹阳. 老旧小区改造的碳排放研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022.
- WANG Danyang. Research on Carbon Emission of Old Residential Areas Renovation [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2022 (in Chinese).
- [20] 安叶, 张义斌, 黎攀, 等. 我国市政生活污水处置现状及经验总结 [J]. 给水排水, 2021, 47 (S1): 94-98.
- AN Ye, ZHANG Yibin, LI Pan, *et al.* Current situation and experience summary of municipal sewage sludge treatment and disposal in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47 (S1): 94-98 (in Chinese).
- [21] 谭学军, 王磊. 我国重点流域典型污水厂污泥处理处置方式调研与分析 [J]. 中国给水排水, 2022, 38 (14): 1-8.
- TAN Xuejun, WANG Lei. Investigation and analysis on the treatment and disposal methods of typical sewage treatment plant sludge in China's key river basins [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38 (14): 1-8 (in Chinese).

作者简介: 贺珊珊(1987-), 女, 湖北天门人, 博士, 高级工程师, 主要从事低碳水处理技术研究。

E-mail: heshanshan2010@126.com

收稿日期: 2023-11-17

修回日期: 2024-02-21

(编辑: 丁彩娟)