

王钰, 李建, 马小蕾, 等. “双碳”背景下兰州市污泥处理处置技术路线综合分析[J]. 净水技术, 2025, 44(11): 108-116.

WANG Y, LI J, MA X L, et al. Comprehensive analysis of technical routes for sludge treatment and disposal in Lanzhou under the background of "dual carbon" [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(11): 108-116.

## “双碳”背景下兰州市污泥处理处置技术路线综合分析

王 钰, 李 建\*, 马小蕾, 王海梅, 师旭军

(中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃兰州 730000)

**摘要** 【目的】 污泥无害化处理和资源化利用是推动水污染防治领域减污降碳协同增效的关键举措。依托污泥“污染”和“资源”的双重属性,本文以兰州市为例,力求探索可行、经济和低碳的污泥处理处置路线,为兰州市的污泥处理处置发展提供科学依据和重要参考。【方法】 本文首先阐述了兰州市市政污泥产生及处理处置现状,明确了污泥无害化处理和资源化利用的紧迫性和必要性,接着分析了兰州市市政污泥的泥质和处置资源条件,并基于此提出可行技术路线,最后对可行技术路线进行了碳排放分析和全生命周期经济评价。【结果】 兰州市现状污泥处理路线接近满负荷且存在较高二次污染风险,亟待寻求科学合理的污泥处理处置系统化方案。“预处理+厌氧消化+土地利用”“好氧发酵+土地利用”与“热干化+污泥焚烧”3种技术路线泥质适配,且在兰州市内均有匹配的处置资源,是可行的技术路线。其中,“热干化+污泥焚烧”碳排放量低,为244 kg CO<sub>2</sub>/(t DS);“好氧发酵+土地利用”总成本最低,为280.83元/t。【结论】 结合各条路线的工艺特征,兰州市现阶段宜采用单点小规模“好氧发酵+土地利用”和“热干化+垃圾协同焚烧/燃煤电厂协同掺烧”的技术方案,可将“深度脱水+卫生填埋”作为应急及备选方案。未来宜开拓“热干化+独立焚烧”或“预处理+厌氧消化+土地利用”的可能性,逐步降低对周边产业的依赖。

**关键词** 污泥处理处置 碳排放 经济评价 技术路线 综合分析

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)11-0108-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.11.012

## Comprehensive Analysis of Technical Routes for Sludge Treatment and Disposal in Lanzhou under the Background of "Dual Carbon"

WANG Yu, LI Jian\*, MA Xiaolei, WANG Haimei, SHI Xujun

(CSCEC AECOM Consultants Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

**Abstract** [Objective] Harmless treatment and resource utilization of sludge are key measures to promote synergistic effects of pollution reduction and carbon reduction in the field of water pollution prevention. Relying on the dual attributes of "pollution" and "resource" of sludge, taking Lanzhou City as an example, this paper strives to explore feasible, economical and low-carbon sludge treatment and disposal routes, providing scientific basis and important reference for the development of sludge treatment and disposal in Lanzhou City. [Methods] This paper first expounded the current situation of municipal sludge generation, treatment and disposal in Lanzhou City, clarified the urgency and necessity of harmless treatment and resource utilization of sludge, then analyzed the sludge quality and disposal resource conditions of municipal sludge in Lanzhou City, and based on this, proposes feasible technical routes. Finally, carbon emission analysis and life cycle economic evaluation were carried out on the feasible technical routes. [Results] The current sludge treatment route in Lanzhou City was close to full capacity and there was a high risk of secondary pollution. It was urgent to seek a scientific and reasonable systematic sludge treatment and disposal scheme. The three technical routes of "pretreatment + anaerobic digestion + land use" " aerobic fermentation + land use" and " thermal drying + sludge incineration" were suitable for sludge quality and there were matching disposal resources in Lanzhou City, which were feasible technical routes. Among them, " thermal drying + sludge incineration" had a low carbon emission of 244 kg CO<sub>2</sub>/(t DS); the total cost of " aerobic fermentation + land use"

[收稿日期] 2024-08-21

[基金项目] 兰州市科技计划项目(2022-2-21);中国市政工程西北设计研究院有限公司科研课题(XBSZKY2221)

[作者简介] 王钰(1995—),女,工程师,研究方向为给排水科学与工程,E-mail:598405958@qq.com。

[通信作者] 李建(1982—),女,高级工程师,研究方向为给排水科学与工程,E-mail:47341648@qq.com。

was the lowest, which was 280.83 yuan/t. [Conclusion] Combining the process characteristics of each route, at present, Lanzhou City should adopt the technical scheme of single-point small-scale " aerobic fermentation + land use" and " thermal drying + collaborative incineration with waste disposal plant/coal-fired power plant", and "deep dewatering + sanitary landfill" can be used as an emergency and alternative scheme. In the future, it is advisable to explore the possibility of " thermal drying + independent incineration" or " pretreatment + anaerobic digestion + land use", and gradually reduce the dependence on surrounding industries.

**Keywords** sludge treatment and disposal carbon emission economic evaluation technical route comprehensive analysis

2022年,《污泥无害化处理和资源化利用实施方案》发布,其中指出,到2025年,全国新增污泥(含水率为80%的湿污泥)无害化处置设施规模不少于2万t/d,地级及以上城市污泥无害化达到95%以上,基本形成设施完备、运行安全、绿色低碳、监管有效的污泥无害化资源化处理体系。2023年,《关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见》发布,意见指出,在污泥稳定化、无害化处置前提下,逐步压减污泥填埋规模,积极采用资源化利用等替代处理方案。同时,“十四五”是碳达峰的关键期、窗口期,“双碳”目标给污泥处理处置技术的选择和发展带来了巨大的挑战。

兰州市是甘肃省省会,地处我国陆域版图几何中心,是西部地区重要中心城市,是丝绸之路经济带重要节点城市,更是黄河流域重要的水源涵养区和补给区,肩负着黄河中上游生态修复、水土保持和污染防治的重任,对污泥进行因地制宜、因时制宜的无害化处理与资源化利用,是贯彻落实环境保护基本

国策并推动战略性新兴产业的重要组成部分,是实现可持续发展的重要途径。

本文将首先论述兰州市市政污泥产生及处理处置情况,接着结合兰州市处置资源,分析兰州市市政污泥可行处理处置路线,最后通过碳足迹和全生命周期成本对可行技术路线进行对比,并对兰州市污泥处理处置提供综合解决方案。

## 1 兰州市市政污泥产生及处理处置现状

### 1.1 污水及污泥产量

兰州市主城区现有4座污水处理厂,由东向西分别为雁儿湾污水处理厂、盐场污水处理厂、七里河安宁污水处理厂、西固污水处理厂。兰州市4座污水处理厂的建设时间及形式存在一定差异,因此,污泥在厂内处置后出泥含水率不同,其中雁儿湾、西固污水处理厂出泥含水率为60%,盐场、七里河安宁污水处理厂出泥含水率为80%,现将4座污水处理厂出泥含水率统一折合为80%,其污水处理量及污泥产量如表1所示。

表1 兰州市城区污水处理厂基本情况  
Tab. 1 Information of Urban WWTPs in Lanzhou City

污水处理厂	污水处理工艺	出水标准	污泥处理工艺	2021年污泥产量/(t·d <sup>-1</sup> )	2022年污泥产量/(t·d <sup>-1</sup> )	2023年污泥产量/(t·d <sup>-1</sup> )
雁儿湾	AAO+MBBR/MBR	一级 A	板框脱水	306	436	534
盐场	改良 AAO+MBR 膜工艺	一级 A	离心脱水	43	47	48
七里河安宁	改良 AAO+MBR 膜工艺	一级 A	离心脱水	236	207	214
西固	AAO	一级 A	板框脱水	100	113	92

注:AAO为厌氧-缺氧-好氧;MBBR为移动床生物膜反应器;MBR为膜生物反应器。

由表1可知,2021年—2023年,兰州市主城区泥量逐渐上升,2023年平均产泥量达888 t/d。盐场、七里河安宁污水处理厂在此期间实施改扩建工程,至今尚未竣工,影响了两厂的污泥产量。

污泥产率为 $2.4 \times 10^{-4} \sim 3.1 \times 10^{-4}$  t DS/m<sup>3</sup>,无随年份增长或下降的趋势。污泥加权平均产率为2.7万 t DS/m<sup>3</sup>,超过全国的平均水平<sup>[1]</sup>,这与兰州市污水悬浮固体高、有机物含量高有关。以污泥加权

平均产率为基准,根据《兰州市排(雨)水防涝工程专项规划(2016—2030)》中对城区4座污水处理厂2030年污水量预测,预测污泥产量如表2所示。

### 1.2 污泥处理处置现状

兰州市主城区现有1座污泥处理处置中心,接收城区污水处理厂产生的市政污泥。其中,盐场、七里河安宁污水处理厂出厂含水率为80%的污泥经处理处置中心内设的板框脱水机脱水至60%后填

**表 2 兰州市城区污水处理厂 2030 年污泥量预测情况**

Tab. 2 Sludge Production Forecast by 2030 in Urban WTPs of Lanzhou

污水 处理厂	现状处理规模/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	预测污水量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	计算污泥量/ (t·d <sup>-1</sup> )
雁儿湾	26 万	20.5 万	277
盐场	4 万	5.9 万	79.7
七里河安宁	20 万	24.2 万	326.7
西固	10 万	18.5 万	250

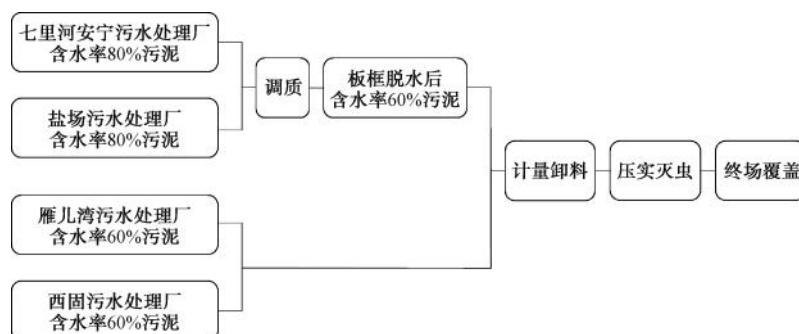


图 1 兰州市污泥现状处理处置路线

Fig. 1 Existing Sewage Sludge Treatment and Disposal Route in Lanzhou City

来说,兰州市污泥处理处置存在规模不足、影响环境和不符合政策的问题,亟待寻求合理可行的技术路线。

## 2 处理处置技术路线选择

近 10 年来,我国城镇污泥泥量显著提升,污泥处理处置方式发生了根本性的改变。通过“十二五”“十三五”等多个科研项目成果产出及示范工程案例应用,目前已形成多种安全稳定的处理处置技术路线。其中,常用的污泥处置技术包括土地利用、建材利用和焚烧处置等<sup>[2]</sup>,常用的污泥处理技术包括厌氧消化、好氧发酵、热干化等<sup>[3]</sup>。

选择污泥处理处置工艺路线应因地制宜,泥质和处置资源条件决定处置方式,处置方式决定处理方式。根据兰州市实际情况,对污泥处理处置路线进行分析。

### 2.1 处置方式

#### 2.1.1 泥质分析

##### 1) 土地利用

对污泥富含的有机质,N、P、K 等矿质元素及含有的潜在重金属污染物进行分析<sup>[4]</sup>,根据具体施用用途满足《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》(GB/T 23486—2009)、《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》(GB/T 24600—2009)、《城镇

埋。西固、雁儿湾污水处理厂出厂含水率为 60% 的污泥直接填埋。兰州市主城区污泥处理处置路线如图 1 所示。

兰州市污泥处理处置中心包含 1 座脱水车间及 1 座污泥填埋场。现状污泥填埋场自 2017 年投入运行以来,原库容(150 万 m<sup>3</sup>)已接近饱和,目前正在进 行升级改造一期工程(扩容 81 万 m<sup>3</sup>),总库容达到 231 万 m<sup>3</sup>,按现状污泥量预计仍能填埋至 2028 年左右。污泥填埋场为敞口式,目前大量臭气外溢。总的

污水处理厂污泥处置 林地用泥质》(CJ/T 362—2011)等强制性要求,同时可与《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016)、《有机肥料》(NY/T 525—2021)等跨行业规范比较,确定后续用量,将兰州市污泥土地利用的泥质对比列入表 3。

兰州市污泥泥质基本符合林地利用、土壤修复和园林利用的强制性要求。其养分含量远高于绿化种植土壤,与有机肥料接近。适合采用撒施、沟施或穴施等施用肥料的方式为林地、土壤和绿化种植物提供养分。

##### 2) 建材利用

污泥建筑材料利用相关标准不完善,目前仅有《城镇污水处理厂污泥处置 制砖用泥质》(GB/T 25031—2010)供参考,而烧结砖、免烧砖、制陶粒和制工程用土等尚无对应泥质标准。制砖泥质标准较酸性土壤改良用泥质宽松,因此,兰州市污泥泥质满足制砖用要求。其他类型需根据接收单位要求泥质进行进一步分析。

##### 3) 焚烧处置

2024 年 4 月,兰州市污泥的热值和元素组成检测结果如表 4 所示。兰州市污泥热值和元素组成可以满足污泥单独焚烧及协同焚烧的基本条件。

表 3 土地利用处置方式下兰州市泥质分析

Tab. 3 Characteristics of Sludge Analysis from Urban WWTPs for Land Use in Lanzhou

指标	兰州污泥	园林绿化用泥质		土壤改良用泥质		林地利用泥质	绿化种植土壤 <sup>2</sup>		有机肥料
		pH 值<6.5	pH 值≥6.5	pH 值<6.5	pH 值≥6.5		pH 值<6.5	pH 值≥6.5	
有机质	31.40%	≥25%		≥10%		≥18%	2%~8%		≥30%
总养分	6%	≥3%		≥1%		≥2.5%	—		≥4%
总镉/(mg·kg <sup>-1</sup> )	2.26/14.37	<5	<20	<5	<20	<20	<1	<1.2	—
总汞/(mg·kg <sup>-1</sup> )	2.22	<5	<15	<5	<15	<15	<1.2	<1.5	≤2
总铅/(mg·kg <sup>-1</sup> )	35.72	<300	<1 000	<300	<1 000	<1 000	<350	<450	≤50
总铬/(mg·kg <sup>-1</sup> )	26.78	<600	<1 000	<600	<1 000	<1 000	<250		≤150
总砷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	11.75		<75		<75	<75	<40	<35	≤15
总铜/(mg·kg <sup>-1</sup> )	125.57	<800	<1 500	<800	<1 500	<1 500	<350	<400	—
总锌/(mg·kg <sup>-1</sup> )	359.53	<2 000	<4 000	<2 000	<4 000	<4 000	<450	<500	—
总镍/(mg·kg <sup>-1</sup> )	50.76	<100	<200	<100	<200	<200	<100	<150	—

注:<sup>1</sup> 表示不同污水处理厂产泥总镉含量相差较大,七里河安宁和盐场污水处理厂产泥总镉平均质量分数为 2.26 mg/kg,雁儿湾和西固污水处理厂产泥总镉平均质量分数为 14.37 mg/kg;<sup>2</sup> 表示绿化种植土壤所列重金属标准为Ⅲ类标准,适用于道路绿化带、工厂附属绿地等有潜在污染源的绿地或防护林等与人接触较少的绿地。

表 4 污泥焚烧处置方式下兰州市泥质分析

Tab. 4 Characteristics of Sludge Analysis from Urban WWTPs for Incineration in Lanzhou City

指标	数值
干基低位热值/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	11.32
C	26.82%
N	4.4%
H	3.9%
S	0.98%
O	9.33%
Cl	0.18%
灰分	54.4%

### 2.1.2 处置资源条件分析

兰州市土地和林地资源相对丰富,水泥窑、制砖厂等污泥处置相关产业均有布局。

#### 1) 土地利用

根据“十四五”期间兰州市林业草原和城市园林绿化规划,2025 年兰州市森林覆盖率达到 10.62%,森林蓄积量增加 15 万 m<sup>3</sup>;草原综合植被覆盖度达到 53.2%;湿地保护率超过 44.16%;建成区绿地率不低于 40%,建成区绿化覆盖率不低于 41%,建成区人均公园绿地面积不低于 12 m<sup>2</sup>。因此,通过土地利用处置途径具有较为广阔的空间。可将污泥消纳与百万亩国家储备林建设,国、省道沿线绿化工程建设等结合,建成一批兼具污泥资源化效益和良好生态效益的示范项目,促进该处置方法的进一步推广。

#### 2) 建材利用

兰州市建材产业体量较小,且以钢材、铝材为主,砖厂基本分散在皋兰县、永登县、榆中县,离主城区较远,暂不考虑污泥消纳。

#### 3) 污泥焚烧

污泥单独焚烧基本不受外界条件影响。协同焚烧与垃圾产业、燃煤发电产业及水泥生产产业布局密切相关。从垃圾协同焚烧看,目前主城区生活垃圾、建筑垃圾和餐厨垃圾处置厂均已满负荷运行,生活垃圾焚烧厂二期工程拟于 2024 年底竣工,届时有消纳部分污泥的可能性;从协同燃煤发电看,距离污水处理厂或污泥处理处置中心小于 20 km 的发电厂共 3 座,分别是范坪热电厂、第二热电厂和西固热电厂,装机容量较大,均有消纳污泥的可能性;从水泥窑协同焚烧看,水泥生产企业主要集中在永登县和榆中县,距离兰州市污泥处理处置厂距离均超过 60 km,运输成本过高,暂不考虑污泥消纳。

综合考虑泥质及处置资源禀赋,兰州市城区污水处理厂出泥除利用污泥处理处置厂内填埋区域填埋外,可采用土地利用(林地利用、土壤修复和园林利用)和焚烧(单独焚烧、污泥与垃圾协同焚烧和燃煤电厂污泥掺烧)的处置方式。

### 2.2 处理处置选择

采用土地利用处置方式时,常用的处理方式包括厌氧消化和好氧发酵。厌氧消化可以将有机物转化为沼气,通常用作天然气的代替品,近年来得到了广泛的应用,但兰州市污泥有机质含量较低(小于 40%),消化效率低,运行难度大,宜增加热水解等预

处理工艺提高消化效率和增加沼气产量<sup>[5]</sup>。好氧发酵可实现易腐有机物的降解和稳定,并为后续土地利用处置环节提供易于植物利用的养分。但好氧发酵需堆肥7~12 d,成品陈化(腐熟)也需要2~7 d,占地较大,有臭气问题,不适宜大规模建设。

采用污泥焚烧处置方式时,常用的处理方式为热干化。与其他类型的固废相比,污泥是较难焚烧的。选择干化的处理方式,可进一步降低污泥含水率,提高污泥的可燃性,减少污泥的运输成本。

集成上述可行处置技术和处理技术,形成3条技术路线,分别是预处理+厌氧消化+土地利用、好氧发酵+土地利用、热干化+焚烧。其中:热干化+焚烧又包括3条子路线,分别是热干化+单独焚烧、热

干化+垃圾协同焚烧、热干化+燃煤电厂掺烧。

### 3 处理处置技术路线碳排放量分析

2020年9月,我国明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标。该目标会使污泥行业发生长期结构性变革,城市污泥应在充分考虑城市处置资源、污泥产量、泥质特性的基础上,选择碳排放低、碳补偿高的处理处置路线。

#### 3.1 核算边界

碳排放核算边界指所有可能产生碳排放的工艺环节,确定一个正确合理的核算边界是污泥处理处置排放量计算的基础。碳排放分为直接碳排放、间接碳排放和碳补偿。考虑到目前污泥已全部经过板框机械脱水过程,因此,本文碳排放核算边界如图2所示。

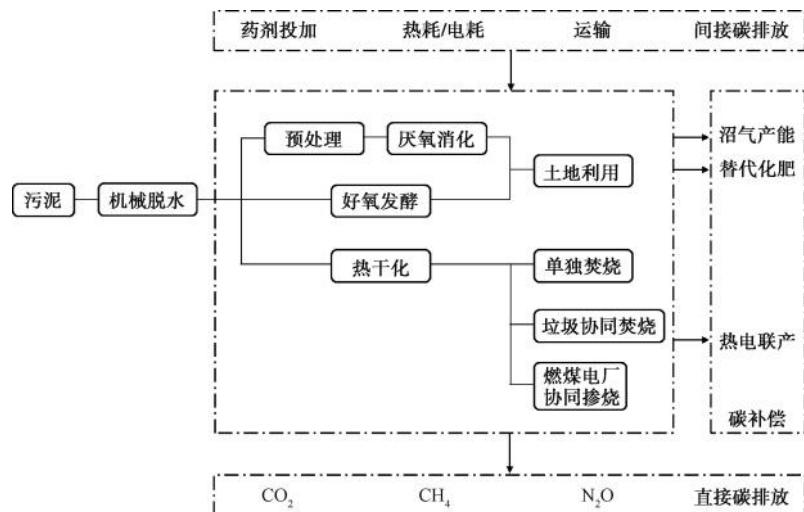


图2 碳排放核算边界

Fig. 2 Boundary of Carbon Emission Accounting

#### 3.2 核算方法

常用的碳排放计算方法包括联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出的排放因子法、质量平衡法、实测法以及全生命周期分析法等,其中,排放因子法的科学性和合理性已得到广泛确认。因此,本文采用排放因子法计算污泥处理处置过程的碳排放量<sup>[6]</sup>。碳排放量为直接碳排放、间接碳排放及碳补偿之和。

直接碳排放为各工艺路线直接排放的CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O等温室气体。不同气体对气候变化的影响不同,为了以相同标准进行对比,引入全球增温潜势的概念,全球增温潜势指的是在一定时期(通常为100年)内,排放到大气中的1 kg温室气体的

辐射强迫与1 kg二氧化碳的辐射强迫的比值。直接碳排放采用的公式如式(1)~式(5),参数值如表5所示。

$$E_{\text{CH}_4-\text{厌氧消化}} = Y_{\text{CH}_4-\text{厌氧消化}} f_{\text{逸散}} G_{\text{CH}_4} \quad (1)$$

$$E_{\text{CH}_4-\text{好氧发酵}} = F_{\text{CH}_4-\text{好氧发酵}} G_{\text{CH}_4} \quad (2)$$

$$E_{\text{N}_2\text{O}-\text{好氧发酵}} = F_{\text{N}_2\text{O}-\text{好氧发酵}} G_{\text{N}_2\text{O}} \quad (3)$$

$$E_{\text{CO}_2-\text{焚烧}} = \gamma_{\text{总碳}} \gamma_{\text{化石碳}} \times \frac{44}{12} \times 10^3 \quad (4)$$

$$E_{\text{N}_2\text{O}-\text{焚烧}} = F_{\text{N}_2\text{O}-\text{好氧发酵}} G_{\text{N}_2\text{O}} \quad (5)$$

其中: $E_{\text{CH}_4-\text{厌氧消化}}$ ——厌氧消化工艺的温室气体排放量,kg CO<sub>2</sub>/(t DS);

$E_{\text{CH}_4-\text{好氧发酵}}$ 、 $E_{\text{N}_2\text{O}-\text{好氧发酵}}$ ——好氧发酵工艺的CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>O排放量,kg CO<sub>2</sub>/(t DS)

$E_{\text{CO}_2}$ -焚烧、 $E_{\text{N}_2\text{O}}$ -焚烧——焚烧工艺的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  排放量,  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ ;  
 $F_{\text{CH}_4}$ -好氧发酵、 $F_{\text{N}_2\text{O}}$ -好氧发酵——好氧发酵工艺的  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  排放因子,  $\text{kg}/(\text{t DS})$ ;  
 $G_{\text{CH}_4}$ 、 $G_{\text{N}_2\text{O}}$ —— $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  气体全球增温潜势;

$Y_{\text{CH}_4}$ -厌氧消化——单位干泥在厌氧消化过程中产生的  $\text{CH}_4$  量,  $\text{m}^3/(\text{t DS})$ ;  
 $f_{\text{逸散}}$ ——厌氧消化产生的  $\text{CH}_4$  中未收集、直接排放的比例;  
 $\gamma_{\text{总碳}}$ 、 $\gamma_{\text{化石碳}}$ ——干污泥中总碳、化石碳所占比例。

表 5 污泥处理处置过程直接碳排放量计算参数

Tab. 5 Calculation Parameters for Direct Carbon Emission in Sludge Treatment and Disposal Process

项目	参数	数值	参考文献
全球增温潜势	$\text{CH}_4$ 全球增温潜势	28	[7]
	$\text{N}_2\text{O}$ 全球增温潜势	265	
热水解+厌氧消化	热水解+厌氧消化过程中的沼气产量	$341 \text{ m}^3/(\text{t DS})$	[8]
	逸散率	0.05	
好氧发酵	发酵过程中的 $\text{CH}_4$ 排放因子	$10 \text{ kg}/(\text{t DS})$	[7]
	发酵过程中的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放因子	$0.6 \text{ kg}/(\text{t DS})$	[7]
干化+焚烧	干污泥中的总碳比例	45%	[7]
	化石碳在总碳中的质量分数	12%	[9]
	焚烧过程中的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放因子	$0.99 \text{ kg}/(\text{t DS})$	[10]

各工艺路线电能消耗、药剂材料消耗、热能消耗以及运输需求所产生的碳排放称为间接碳排放。间接碳排放的计算需综合考虑所有可能涉及的工艺步骤, 并确立相应的计算模型。间接碳排放采用式(6)进行计算, 活动数据和排放因子的取值如表 6 所示。

$$E_{\text{间接}} = D_{\text{间接}} F_{\text{间接}} \quad (6)$$

其中:  $E_{\text{间接}}$ ——温室气体排放量,  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ ;

$D_{\text{间接}}$ ——间接活动数据, 即引发排放的活动实际规模, 单位视活动而定, 如耗电为  $\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{t DS})$ ;  
 $F_{\text{间接}}$ ——间接活动排放因子, 即单位活动量对应的排放量, 单位视活动而定, 如耗电为  $\text{kg CO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

表 6 污泥处理处置过程间接碳排放量计算参数

Tab. 6 Calculation Parameters for Indirect Carbon Emission in Sludge Treatment and Disposal Process

项目	参数	数值	参考文献
排放因子	电力排放因子	$0.5839 \text{ kg CO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$	—
	热力排放因子	$110 \text{ kg CO}_2/\text{GJ}$	
活动数据	预处理(热水解)电耗	$50 \text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{t DS})$	[11]
	预处理(热水解)热耗	$3.24 \text{ GJ}/(\text{t DS})$	[12]
厌氧消化电耗	厌氧消化电耗	$50 \text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{t DS})$	[11]
	热干化电耗	$70 \text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{t DS})$	
热干化热耗	热干化热耗	$9.16 \text{ GJ}/(\text{t DS})$	[13]
	焚烧电耗	$300 \text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{t DS})$	
好氧发酵电耗	好氧发酵电耗	$60 \text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{t DS})$	[10]
	运输柴油	$43.33 \text{ GJ}/(\text{t DS})$	[12]

污泥处理处置过程中, 除上述两部分碳排放外, 还可通过植物直接固定  $\text{CO}_2$  形成碳汇或回收能源、

资源方式形成碳抵消能量, 称为碳补偿。碳补偿采用的公式如式(7)~式(9), 参数值如表 7 所示。

$$E_{\text{CO}_2-\text{沼气产能}} = Y_{\text{CH}_4-\text{厌氧消化}} \times (1 - f_{\text{逸散}}) \times \eta_{\text{CH}_4-\text{电}} F_{\text{电力}} \quad (7)$$

$$E_{\text{CO}_2-\text{热电联产}} = \frac{(Q_{\text{均值}} - Q_{\text{损耗}})}{3.6} \times \eta_{\text{热电联产}} \times 10^{-3} \times F_{\text{电力}} \quad (8)$$

$$E_{\text{CO}_2-\text{土地利用}} = (F_{\text{氮肥制造}} \omega_N + F_{\text{磷肥制造}} \omega_P) \times \frac{44}{12} \quad (9)$$

其中: $E_{\text{CO}_2-\text{沼气产能}}$ 、 $E_{\text{CO}_2-\text{热电联产}}$ 、 $E_{\text{CO}_2-\text{土地利用}}$ ——沼气产能、热电联产、土地利用所对应的碳补偿;

$\eta_{\text{CH}_4-\text{电}}$ —— $\text{CH}_4$  产电量, $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ;

$Q_{\text{均值}}, Q_{\text{损耗}}$ ——热值均值、损耗, $\text{GJ}/\text{t}$ ;

$F_{\text{电力}}$ ——电力排放因子, $\text{kg CO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ;

$\eta_{\text{热电联产}}$ ——热电联产效率;

$F_{\text{氮肥制造}}, F_{\text{磷肥制造}}$ ——单位氮肥、磷肥制造排放因子, $\text{kg/kg}$ ;

$\omega_N, \omega_P$ ——每吨干泥制成的污泥产品中氮、磷的质量分数, $\text{g/kg}$ 。

表 7 污泥处理处置过程碳补偿计算参数

Tab. 7 Calculation Parameters for Carbon Offsetting in Sludge Treatment and Disposal Process

项目	参数	数值	参考文献
沼气产能	$\text{CH}_4$ 单位体积产电量	2.3 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$	[14]
热电联产	热值均值	11.9 $\text{GJ}/\text{t}$	[15]
	热值损耗	0.8 $\text{GJ}/\text{t}$	
	热电联产效率	80%	
土地利用	单位氮肥制造排放因子	2.116 $\text{kg/kg}$	[16]
	单位磷肥制造排放因子	0.636 $\text{kg/kg}$	

### 3.3 核算结论

预处理(热水解)+厌氧消化+土地利用路线的总碳排放量为 245  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ 。路线中的直接碳排放主要为厌氧消化期间管道泄漏产生的  $\text{CH}_4$ , 泄漏量按 5% 考虑, 核算结果为 344  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ ; 路线中的间接碳排放主要为预处理(热水解)消耗的电耗、热耗, 厌氧消化消耗的电耗以及运输能耗, 其中预处理(热水解)消耗的电耗、热耗为 533  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ , 厌氧消化消耗的电耗为 29  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ , 运输主要包括污泥产品至土地利用地点的碳排放 3.15  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ ; 预处理(热水解)+厌氧消化+土地利用路线的碳补偿包括沼气产能及替代化肥。根据北京小红门污泥热水解消化项目经验核算, 干泥产  $\text{CH}_4$  量约为 341  $\text{m}^3/\text{t}$ , 折算沼气产能碳补偿量为 313  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ , 替代化肥主要通过消化产品替代磷肥和氮肥, 碳补偿为 351  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ 。

好氧发酵+土地利用技术的总碳排放量为 267  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ 。路线中的直接碳排放主要为好氧发酵期间产生的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$ , 其中  $\text{CO}_2$  属于生源碳, 不计入总排放中, 核算结果为 439  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ ; 路线中的间接碳排放主要为好氧发酵期间消耗的电耗和运输能耗, 其中电耗为 175  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ ,

( $\text{t DS}$ ), 运输主要包括污泥产品至土地利用地点的碳排放 3.15  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ ; 好氧发酵+土地利用路线的碳补偿主要通过好氧发酵产品替代磷肥和氮肥, 碳补偿为 351  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ 。

热干化+单独焚烧/垃圾协同焚烧/燃煤电厂协同掺烧的总碳排放量为 244  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ 。路线中的直接碳排放主要为焚烧期间产生的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$ , 直接碳排放仅计入化石碳燃烧产生的  $\text{CO}_2$  排放, 且单独焚烧设备考虑为连续性大型高效流化床焚烧炉, 协同焚烧含有其他高热值燃料, 因此, 不考虑不完全燃烧导致的  $\text{CH}_4$  排放, 核算结果为 460  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ ; 路线中的间接碳排放主要为干化过程的电热耗、焚烧过程的电耗和运输能耗, 其中干化电热耗碳排放为 1 048  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ , 焚烧过程的电耗碳排放为 175  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ , 运输主要包括干化产品至处置地点的碳排放 1  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ ; 热干化+单独焚烧/垃圾协同焚烧/燃煤电厂协同掺烧路线的碳补偿主要通过热电联产技术转化为电能实现, 碳补偿为 1 440  $\text{kg CO}_2/(\text{t DS})$ 。

将 3 种污泥处理和处置方案的碳足迹情况汇总于图 3 中。

由核算结论与图 3 可知, 3 条技术路线碳排放基本持平。预处理(热水解)+厌氧消化+土地利用

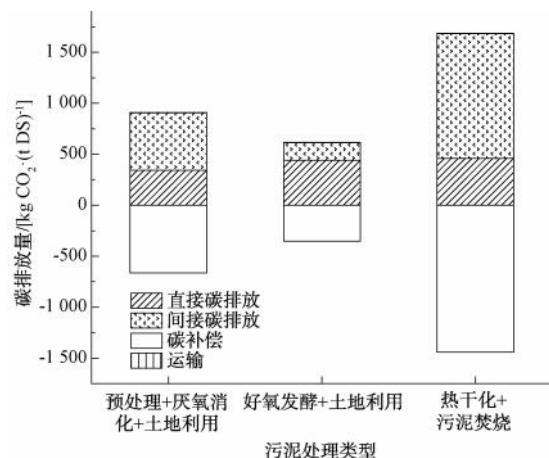


图3 污泥处理处置过程碳排放量计算结果

Fig. 3 Calculation Results for Carbon Emission during Sludge Treatment and Disposal Process

技术碳排放主要来源为预处理工艺的电耗和热耗,若泥质允许直接进行消化,则碳排放量将大大减小;

表8 污泥处理处置过程成本分析和经济效益分析

Tab. 8 Analysis of Cost and Economic Benefits in Urban Sludge Treatment and Disposal Process

处理处置路线	投资成本/ (元·t <sup>-1</sup> )	运行成本/ (元·t <sup>-1</sup> )	运输成本/ (元·t <sup>-1</sup> )	总成本/ (元·t <sup>-1</sup> )	经济效益/ (元·t <sup>-1</sup> )
预处理+厌氧消化+土地利用	186	212	32.5	398	100 <sup>[17]</sup>
好氧发酵+土地利用	106.41	141.92	32.5	280.83	100 <sup>[17]</sup>
热干化+焚烧	热干化+单独焚烧	157	343	0	500
热干化+垃圾协同焚烧	36	388	1.3	425.3	—
热干化+燃煤电厂协同掺烧	36	388	9.75	433.75	—

注:以含水率为80%的污泥为核算单位。

热干化+单独焚烧的总成本最高,一次性投资最高,且不产生经济效益。热干化+污泥焚烧的总成本次之,一次性投资最小,运行成本最高,其中最主要的运行成本为垃圾处置厂和燃煤电厂收取的处置费用。好氧发酵+土地利用的总成本最低,且产生经济效益,最具经济性。

## 5 结论

(1) 兰州市平均产泥量达888 t/d,采取的处理路线为“深度脱水+卫生填埋”,该路线处置场地接近满负荷且存在较高二次污染风险,不符合国家政策要求,不应作为主要消纳方式,仅可作为应急备用消纳。寻求科学合理的污泥处理处置系统化方案,是目前兰州市污泥处理处置的首要任务。

(2) “预处理+厌氧消化+土地利用”“好氧发酵+土地利用”与“热干化+污泥焚烧”这3种技术路线泥质适配,且在兰州市内均有匹配的处置资源,是

好氧发酵+土地利用技术虽然间接碳排放较低,但碳补偿途径单一,因此,碳排放量处于相对高值;热干化+单独焚烧/垃圾协同焚烧/燃煤电厂协同掺烧路线在干化阶段热耗较高,但焚烧阶段通过热电联产可回收较多能量。相较于兰州市目前采用的深度脱水+卫生填埋路线[1 230.55 kg CO<sub>2</sub>/(t DS)],预处理(热水解)+厌氧消化+土地利用、好氧发酵+土地利用和热干化+单独焚烧/垃圾协同焚烧/燃煤电厂协同掺烧3条路线均为碳排放量较低的污泥处理处置路线。

## 4 处理处置路线经济性分析

污泥处理处置涉及大量的设备投入、工程占地、能耗物耗、运营成本等经济因素,技术路线的选择应经过经济可行性的综合评估。将技术路线下的投资成本、运行成本、运输成本及可能产生的经济效益列入表8中。

表8 污泥处理处置过程成本分析和经济效益分析

Tab. 8 Analysis of Cost and Economic Benefits in Urban Sludge Treatment and Disposal Process

可行的技术路线。

(3) “好氧发酵+土地利用”可结合“十四五”重大林地或绿化工程建立土地利用示范项目,最具经济性;“热干化+污泥焚烧”碳排放量低,其中协同焚烧处置资源丰富,且投资较小。结合前文各条路线的工艺特征,兰州市现阶段宜采用单点小规模“好氧发酵+土地利用”和“热干化+垃圾协同焚烧/燃煤电厂协同掺烧”的技术方案,并将“深度脱水+卫生填埋”作为应急及备选方案。未来宜开拓“热干化+独立焚烧”或“预处理+厌氧消化+土地利用”的可能性,逐步降低对周边产业的依赖。

## 参考文献

- [1] 陈敏敏,刘杰,李莉娜,等.我国城镇污水处理厂污泥产率系数现状及影响因素分析[J].工业水处理,2024,44(3):24-29.

- CHEN M M, LIU J, LI L N, et al. Analysis of the status and influencing factors of sludge yield coefficient of municipal wastewater treatment plants in China [J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(3): 24–29.
- [ 2 ] ZHOU X, YANG J X, ZHAO X Y, et al. Towards the carbon neutrality of sludge treatment and disposal in China: A nationwide analysis based on life cycle assessment and scenario discovery[J]. Environment International, 2023, 174: 107927. DOI: 10.1016/j.envint.2023.107927.
- [ 3 ] 王莉,何蓉,雷海涛. 城镇污水处理厂污泥处理处置技术现状综述[J]. 净水技术, 2022, 41(11): 16–21, 69.
- WANG L, HE R, LEI H T. General review of sludge treatment and disposal technology for urban WWTP [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(11): 16–21, 69.
- [ 4 ] GUO D, LI B, YU W, et al. A system engineering perspective for net zero carbon emission in wastewater and sludge treatment industry: A review [J]. Sustainable Production and Consumption, 2024, 46: 369 – 381. DOI: 10.1016/j.spc.2024.02.033.
- [ 5 ] HUANG Y Q, ZHEN Y H, LIU L L, et al. Comprehensive competitiveness assessment of four typical municipal sludge treatment routes in China based on environmental and techno-economic analysis[J]. Science of the Total Environment, 2023, 895: 165123. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165123.
- [ 6 ] CHU X, FEI Z X, CHU Z J, et al. Decarbonizing the sludge treatment industry: Assessing the feasibility of achieving carbon reduction from carbon peaking to carbon neutrality[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434: 140023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140023.
- [ 7 ] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [EB/OL]. (2023-07-01) [2024-08-01] <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.
- [ 8 ] 宋晓雅. 污泥热水解厌氧消化与常规厌氧消化的运行比较[J]. 给水排水, 2019, 45(3): 26–30.
- SONG X Y. Comparison of operation between thermal hydrolysis anaerobic digestion and conventional anaerobic digestion [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(3): 26–30.
- [ 9 ] 郝晓地, 王向阳, 曹达啟, 等. 污水有机物中化石碳排放 CO<sub>2</sub> 辨析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(2): 13–17.
- HAO X D, WANG X Y, CAO D Q, et al. Analysis of CO<sub>2</sub> emission from fossil carbon in organics from wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(2): 13–17.
- [ 10 ] 张楠, 孟祥瑞. 城市污水处理厂污泥处理处置碳排放分析——以淮南市为例[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2023, 43(5): 83–93.
- ZHANG N, MENG X R. Carbon emissions from sludge treatment and disposals in municipal sewage treatment plant: A case study of Huainan City[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 43(5): 83–93.
- [ 11 ] 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 L, LI D B, LIU Z W, et al. Analysis on carbon emission from sludge treatment and disposal [J]. China Environmental Science, 2022, 42(5): 2404–2412.
- [ 12 ] 夏雪, 邵钱祺, 曹悦, 等. 不同处理模式下污泥厌氧消化的能源回收与碳排放分析[J]. 环境工程, 2023, 41(7): 1–7, 13.
- XIA X, SHAO Q Q, CAO Y, et al. Analysis of energy recovery and carbon emission during sludge anaerobic digestion under different treatment routes [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(7): 1–7, 13.
- [ 13 ] 李哲坤, 张立秋, 杜子文, 等. 城市污泥不同处理处置工艺路线碳排放比较[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 1181–1190.
- LI Z K, ZHANG L Q, DU Z W, et al. Comparison of carbon emissions in different treatment and disposal of municipal sludge [J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 1181–1190.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] 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 X D, CHEN Q, LI J, et al. Ultimate approach to handle excess sludge: Incineration and drying [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4): 35–42.
- [ 16 ] 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 S, LU F, WANG X K. Estimation of greenhouse gases emission factors for China's nitrogen, phosphate, and potash fertilizers[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6371–6383.
- [ 17 ] 汪钧逸, 陈威, 吴远柱, 等. 市政污泥处理处置技术经济性分析与评价[J]. 环境工程学报, 2023, 17(8): 2695–2704.
- WANG J Y, CHEN W, WU Y Z, et al. Economic analysis and evaluation of municipal sludge treatment and disposal technology [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(8): 2695–2704.