



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202303142 中图分类号 X703 文献标识码 A

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 Junyi, CHEN Wei, WU Yuanzhu, et al. Economic analysis and evaluation of municipal sludge treatment and disposal technology[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(8): 2695-2704.]

## 市政污泥处理处置技术经济性分析与评价

汪钧逸<sup>1,2</sup>, 陈威<sup>1,3,✉</sup>, 吴远柱<sup>1,3</sup>, 何小威<sup>1,3</sup>, 罗阳<sup>1,3</sup>, 颜莹莹<sup>1</sup>, 张雨晨<sup>1</sup>, 熊卓<sup>2</sup>, 赵永椿<sup>2</sup>

1. 长江生态环保集团有限公司, 武汉 430010; 2. 华中科技大学, 武汉 430074; 3. 长江清源节能环保有限公司, 上海 200000

**摘要** 针对由污泥处理处置成本核算复杂导致的技术路线抉择困难的问题, 从经济性角度对市政污泥土地、建材 2 类资源化利用路径典型技术路线进行评估, 以帮助决策者权衡污泥处理处置全工艺链条的选择。通过生命周期成本评价方法评价了市政污泥处理处置典型技术路线, 并利用敏感性分析方法对产业布局、土地利用季节性、建材产业生产波动与污泥处理处置成本的动态响应机制进行了探究。生命周期成本评价结果表明, 土地利用路径生命周期成本为 310~523 元·t<sup>-1</sup>, 经济效益为 100~255 元·t<sup>-1</sup>; 建材利用的生命周期成本为 123~238 元·t<sup>-1</sup>, 经济效益为 24~78 元·t<sup>-1</sup>。综合生命周期成本、经济效益以及绿色低碳原则, 市政污泥处理处置路线应以土地利用为主、建材利用为辅。敏感性分析结果表明, 在保证污泥处置含水率达标的前提下, 降低污泥脱水率、缩短污水处理厂到污泥处理处置中心的运输距离有利于减少成本; 好氧发酵-土地利用路线的污泥处置成本对污泥产品临时储存量的敏感度最高, 超过 30%, 故有必要设置储存仓库以稳定成本波动。本研究结果可为市政污泥资源化利用路径选择、成本评估和产业布局优化有参考意义。

**关键词** 市政污泥; 处理处置; 经济性评价; 生命周期成本; 敏感性分析

我国污水排放量增长导致污泥产量不断提升, 污泥沿江城市“厂网河(湖)岸”全要素水环境治理工作的开展也导致市政污泥量大大增加<sup>[1]</sup>。据《2020 年城乡建设统计年鉴》<sup>[2]</sup>统计, 2020 年我国含水率 80% 的污泥产量已经超过 6 600×10<sup>4</sup> t, 预计在 2025 年突破 9 000×10<sup>4</sup> t<sup>[3]</sup>。“重水轻泥”观念导致我国污泥无害化、资源化仍处于较低水平<sup>[4]</sup>。目前, 我国污泥无害化处置率达 73.5%<sup>[5]</sup>, 而资源化利用率不足 30%<sup>[6]</sup>。由于市政污泥产量大、存在二次污染风险<sup>[7-8]</sup>, 其安全处置问题是许多研究者长期以来关注的重点。“十四五”计划中明确, 到 2035 年全面实现污泥无害化处置, 污泥资源化利用水平显著提升。目前, 立足于“双碳”战略<sup>[9]</sup>, 我国污泥资源化主流路线为土地利用以及建材利用<sup>[10-11]</sup>, 以满足污泥的减量化、资源化要求。

然而, 成本和价格机制是横亘在我国污泥资源化道路上不可忽视的现实问题。目前我国污泥处理处置仍存在着主体不一, 企业分散, 成本高、难以协同; 价格机制未落实, 政府负担重, 不可持续; 污泥行业缺乏可持续的价格机制等问题<sup>[12]</sup>。由于土地利用路径在前处理环节的能耗、加工成本较高, 其污泥产品溢价能力有限, 和相对同类产品的市场竞争力不足, 呈现“长远利好、现

收稿日期: 2023-03-24; 录用日期: 2023-07-20

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFC1908705)

第一作者: 汪钧逸(1997—), 女, 博士研究生, [junyiwang@hust.edu.cn](mailto:junyiwang@hust.edu.cn); ✉通信作者: 陈威(1987—), 男, 硕士, [chen\\_wei27@ctg.com.cn](mailto:chen_wei27@ctg.com.cn)

实看空”的局面<sup>[13]</sup>；另一方面，污泥土地利用消纳存在季节性波动，无法稳定作为污泥消纳出口。而对于建材利用路线，以污泥为原料生产建材产品存在运输距离远、成本高、售价低等不足，如果没有政府优惠政策扶持，建材生产企业在污泥产品经济性没有明显优势的情况下，易出现盈利不够而失去污泥建材利用的积极性的情况<sup>[14]</sup>；同时，建材本身存在生产规律，水泥窑企业也存在生产波动，建材利用同样存在消纳不稳定的问题。综上，污泥土地和建材利用的价格机制不成熟以及无法稳定消纳等问题造成了污泥处理处置成本核算的复杂性，直接导致了市场动态定价策略不明晰。因此，有必要开展市政污泥处理处置技术经济性分析的研究。

董峙标等<sup>[15]</sup>对大连市夏家河污泥处理厂污泥“厌氧消化+脱水”工艺成本进行分析，得到其处理成本约为135元，投资成本约为 $2.5 \times 10^5$ 元·t<sup>-1</sup>（以含水率80%计）。单连斌等<sup>[16]</sup>以我国北方城市沈阳为样本，通过成本折算法得到污泥处理成本为308.9元·tDT<sup>-1</sup>，外运处置成本为387.5元·tDT<sup>-1</sup>。侯晓峰等<sup>[17]</sup>通过简单的定量法对市政污泥土地利用的效益-成本进行分析，认为污泥土地利用符合我国国情，但很难获得人们的支付意愿。可以看出目前针对我国市政污泥处理处置技术路线经济性分析的研究较多，但缺乏标准化方法。而生命周期成本(LCC)评价是系统评估产品或过程中经济影响的标准化方法，已被广泛应用于污水和固废处理领域<sup>[18-19]</sup>，但其在我国污泥处理处置领域的研究仍不够充分。LI等<sup>[20]</sup>利用混合生命周期评价对不同有机质含量下的污泥焚烧进行了环境影响和经济评估，结果表明厌氧消化和水泥窑联合焚烧是处理高有机污泥的最优选择。XU等<sup>[21]</sup>构建了生命周期环境与经济集成模型，对不同的污泥处理处置路线的评估结果显示重力浓缩、厌氧消化、脱水以及焚烧是适合当时中国污泥处理处置的方式。而LCC评价方法目前的问题，一是面对我国众多污泥处理处置技术路线，缺乏全链条成本评价，二是随着我国相关政策不断更新，相关研究也亟待更新。

因此，本研究通过LCC评价方法对市政污泥处理处置各技术路线进行评价分析，并结合敏感性分析以探究产业布局、土地利用季节性、建材产业生产波动与污泥处理处置成本的动态响应机制，以期为市政污泥处理处置技术路线选择、成本评估和产业布局优化提供参考，并帮助决策者权衡不同污泥处理处置全工艺链条的选择。

## 1 研究方法

### 1.1 经济性分析

1) 分析方法。利用LCC评价方法对其所从事活动全过程的成本进行评价，综合考虑各污泥处理处置路线，将构建的模型应用到典型污泥处理处置路线差异化成本核算中，以投资成本、运行成本和运输成本量化典型污泥处理处置路径的内部成本，分析典型市政污泥处理处置路径的经济性。

市政污泥处理处置成本主要由污泥处理处置阶段发生的投资成本、运行成本、污泥运输成本3个部分构成，具体见式(1)~式(3)。

$$C = C_i + C_r + C_t \quad (1)$$

式中： $C$ 为单位成本，(元·t<sup>-1</sup>)； $C_i$ 为单位投资成本，(元·t<sup>-1</sup>)； $C_r$ 为单位运行成本，(元·t<sup>-1</sup>)； $C_t$ 为单位运输成本，(元·t<sup>-1</sup>)。

$$C_i = I \times \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} \quad (2)$$

式中： $I$ 为污泥投资成本，(元·t<sup>-1</sup>)； $i$ 为折旧率(4%)； $n$ 为预计使用寿命(20 a)。

$$C_t = T \times S \quad (3)$$

式中： $T$ 为单位距离运输成本，(元·(t·km)<sup>-1</sup>)； $S$ 为运输路程，(km)。

污泥为特殊固体废物，需特殊箱体货车运送，含水率为 80% 的污泥运输价格取  $0.65 \text{ 元} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 。一般地，从污水处理厂到污泥处理中心的运输距离为 50 km。

2) 数据质量评估。数据质量评估主要从 6 个维度对其进行分析，分别是数据获取方法、数据提供者的独立性、数据代表性、数据时效性、地理关联度、技术关联度。数据质量的评估矩阵如表 1 所示。表中分数越低代表数据质量越高，反之，分数越高代表数据质量越低。

表 1 数据质量评估矩阵  
Table 1 Data quality assessment matrix

| 指标分数 | 获取方法        | 数据提供者的独立性        | 数据代表性            | 数据时效性      | 地理关联度               | 技术关联度               |
|------|-------------|------------------|------------------|------------|---------------------|---------------------|
| 1    | 实测数据        | 公共部门的认证数据        | 来自长时期内足量样本的代表性数据 | 3年内        | 研究区域内的数据            | 来自同一公司、同一技术、同一材料的数据 |
| 2    | 基于实测数据的计算数据 | 专业企业的认证数据        | 来自长时期内小量样本的代表性数据 | 5年内        | 主要研究区域内的平均数据        | 来自不同公司、同一技术、同一材料的数据 |
| 3    | 部分基于假设的计算数据 | 来自行业的非认证数据(独立源)  | 来自短时期内足量样本的代表性数据 | 10年内       | 相似生产情况的地区数据         | 来自不同技术、同一材料的数据      |
| 4    | 行业专家的专业估测   | 来自行业的非认证数据(非独立源) | 来自短时期内足量样本的普通数据  | 20年内       | 部分相似生产情况的地区数据       | 同一技术、相关材料的数据        |
| 5    | 非专业评估       | 专业企业的非认证数据       | 来自短时期或小量样本的不完整数据 | 未知年份或超过20年 | 未知区域数据或生产情况差异大的地区数据 | 不同技术、相关材料的数据        |

3) 功能单位。将 1 t 湿污泥 (含水率 80%) 作为功能单位。

4) 系统边界。市政污泥土地利用和建材利用典型处理处置路线 (R1-R7) 和市政污泥处理处置生命周期核算边界如图 1 所示。R1-R4 为土地利用路线，其中，R1 为餐厨协同厌氧消化-林地利用路线，R2 为餐厨协同厌氧消化-园林利用路线，R3 为好氧发酵-林地利用路线，R4 为好氧发酵-园林利用路线；R5-R6 为建材利用路线，其中，R5 为砖窑协同制砖路线，R6 为水泥窑协同制水泥路线；R7 为传统热干化-焚烧路线。

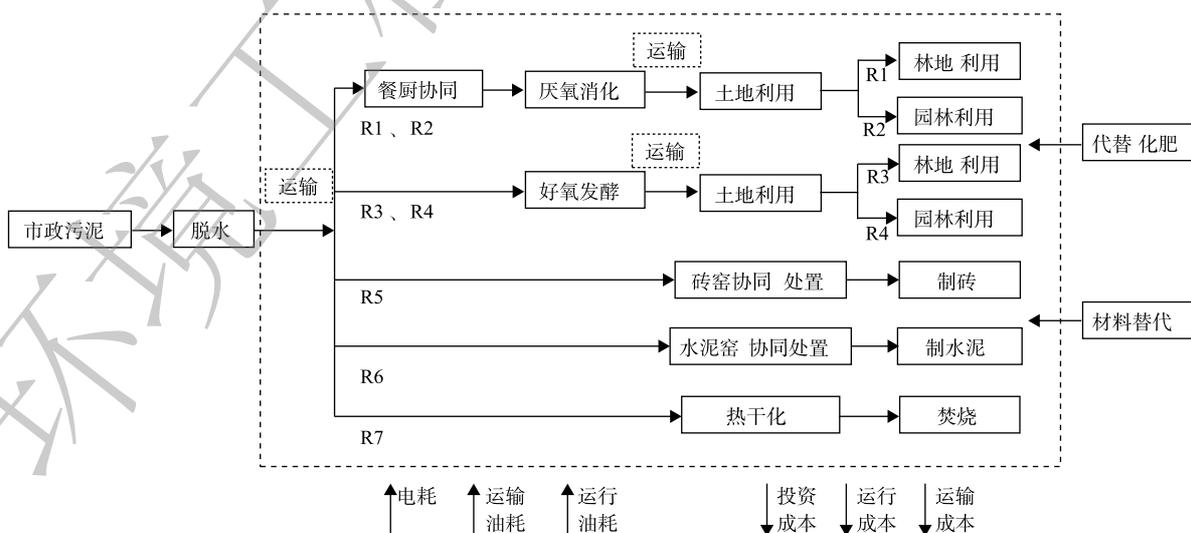


图 1 市政污泥处理处置系统边界

Fig. 1 Municipal sludge treatment and disposal system boundary

5) 市政污泥性质。市政污泥是污水处理的副产物,除含有大量水分之外,还富集了污水中的重金属、有机污染物等有害物质以及有机质、N、P等营养物质,既对环境有危害性,也具备资源化利用的潜力。与发达国家不同,我国的市政污泥产量大、低有机质、高含沙量,具体性质见表2。

6) 生命周期清单。生命周期清单数据基于以下数据和假设。

厌氧消化:工艺流程为高温热水解-餐厨协同厌氧消化-深度脱水,参考镇江餐厨协同厌氧消化一期项目。

焚烧:单独焚烧过程中污泥焚烧产生的热量可以使其自持燃烧,不需添加额外燃料。

土地利用:污泥土地利用路线包含污泥产品从污泥处置中心运输到土地的过程,假设污泥处置中心运输到林地距离为50 km,污泥处置中心运输到园林距离为25 km。典型市政污泥处理处置生命周期清单见表3。

## 1.2 敏感性分析方法

利用敏感性分析方法,以产业布局、土地利用季节性、建材产业生产波动作为关键因素,计算其变化对污泥处理处置的影响程度,并其与污泥处理处置成本的动态响应机制。敏感度计算具体见式(4)。

$$S_{mn} = \frac{\Delta O_m}{O_m} \times \frac{I_n}{\Delta I_n} \quad (4)$$

式中: $O_m$ 为第 $m$ 种未达标的生命周期成本结果指标值; $I_n$ 为第 $n$ 种过程清单数据值(或原始数据值)。当 $I_n$ 变化时, $O_m$ 也相应地变化, $S_{mn}$ 即为 $I_n$ 对 $O_m$ 的敏感度。 $S_{mn}$ 越大,即敏感性系数越高,项目成本对该不确定因素敏感程度越高。

## 2 结果与讨论

### 2.1 成本核算

1) 工艺单元成本。结合文献[23-29]和实地调研,并利用式(2)和式(3)计算得到了市政污泥各工艺单元的成本,见表4。

污泥处理处置各工艺单元成本的数据质量评估结果见表5。数据质量评估结果显示,各数据的平均值为1.33~2,数据质量较好。

2) 经济效益。餐厨协同厌氧消化-土地利用:以镇江市餐厨废弃物及生活污水协同处理项目一期为例,该项目生物碳土产生量 $41 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ,碳土、苗木每年收入 $200 \times 10^4$ 元,折合每吨污泥21元。产沼气 $1 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,每日可

表2 市政污泥性质<sup>[3,22]</sup>

| 成分    | 组成           | 含量范围/(g·kg <sup>-1</sup> ) |
|-------|--------------|----------------------------|
| 重金属   | Zn、Cu、Cr、Pb等 | 0~30.1                     |
| 有机污染物 | 抗生素、邻苯二甲酸酯等  | 0~33.8                     |
| C     | —            | 321.3~355.7                |
| N     | —            | 7.4~54.9                   |
| P     | —            | 2.2~48.3                   |

表3 典型市政污泥处理处置生命周期清单

| 工艺   | 原材料消耗 |           |      |
|------|-------|-----------|------|
|      | 药耗/kg | 电耗/(kW·h) | 油耗/L |
| 厌氧消化 | 1     | 35        | 0    |
| 好氧发酵 | 0     | 34        | 0    |
| 林地利用 | 0     | 0         | 115  |
| 园林利用 | 0     | 0         | 58   |
| 制砖   | 0     | 24        | 0    |
| 制水泥  | 0     | 60        | 0    |
| 单独焚烧 | 0     | 55        | 9    |

表4 各工艺单元成本

| 工艺类型 | 工艺名称                        | 投资成本/(元·t <sup>-1</sup> ) | 运行成本/(元·t <sup>-1</sup> ) |
|------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 污泥处理 | 餐厨协同厌氧消化 <sup>[23-24]</sup> | 127                       | 227                       |
|      | 好氧发酵 <sup>[23-24]</sup>     | 71                        | 140                       |
|      | 热干化 <sup>[24-25]</sup>      | 36                        | 133                       |
| 污泥处置 | 林地利用 <sup>[24]</sup>        | —                         | 104                       |
|      | 园林利用 <sup>[24]</sup>        | —                         | 50                        |
|      | 单独焚烧 <sup>[26-27]</sup>     | 121                       | 210                       |
|      | 制砖 <sup>[28-29]</sup>       | 30                        | 60                        |
|      | 制水泥 <sup>[29]</sup>         | 65                        | 140                       |

表 5 污泥处理处置成本数据质量评估结果

Table 5 Sludge treatment and disposal cost data quality assessment results

| 工艺单元     | 数据质量评分 |           |       |       |       |       | 平均值  |
|----------|--------|-----------|-------|-------|-------|-------|------|
|          | 获取方法   | 数据提供者的独立性 | 数据代表性 | 数据时效性 | 地理关联度 | 技术关联度 |      |
| 餐厨协同厌氧消化 | 2      | 2         | 2     | 1     | 1     | 1     | 1.33 |
| 好氧发酵     | 2      | 2         | 2     | 2     | 1     | 2     | 1.83 |
| 热干化      | 3      | 1         | 2     | 2     | 1     | 2     | 1.83 |
| 林地利用     | 2      | 1         | 2     | 2     | 1     | 2     | 1.67 |
| 园林利用     | 2      | 1         | 2     | 2     | 1     | 2     | 1.67 |
| 制砖       | 3      | 1         | 2     | 2     | 1     | 2     | 1.83 |
| 制水泥      | 2      | 2         | 2     | 1     | 1     | 1     | 1.33 |
| 焚烧       | 3      | 1         | 2     | 2     | 1     | 2     | 1.83 |

向市政燃气管网输送成品天然气 2 800 m<sup>3</sup>，天然气营业收入 24 元·t<sup>-1</sup>。油脂销售收入 2 000×10<sup>4</sup> 元·a<sup>-1</sup>，折合 210 元·t<sup>-1</sup>。产生经济效益合计 255 元·t<sup>-1</sup>。

好氧发酵-土地利用：经过好氧发酵后，每吨污泥可以产生 0.5 t 基质土，产生效益 100 元·t<sup>-1</sup>。

砖窑协同处置：每吨污泥干化焚烧后可以制造砖 120 块，售价 78 元。

水泥窑协同处置：污泥在水泥窑焚烧后灰渣直接作为无机原料用于生产水泥，每吨污泥大约可生产水泥 0.06 t，售价 24 元·t<sup>-1</sup> (1 t 湿污泥产生灰渣 0.06 t)。市政污泥处置经济效益见表 6。

3) 成本分析。市政污泥处理处置各路径成本见图 2。从图 2 可以看出，污泥协同制砖 (R5) 的生命周期成本最低，为 123 元·t<sup>-1</sup>。餐厨协同厌氧消化-林地利用 (R1) 的生命周期成本最高，为 523 元·t<sup>-1</sup>。这是由于污泥厌氧消化工艺较复杂，导致前期投资成本及运行成本都较高，且餐厨垃圾的协同处置进一步提高了该路径的生命周期成本。同时，厌氧消化-土地利用路线的经济效益也最高，为 255 元·t<sup>-1</sup>。这主要由于污泥厌氧消化路线的产品多样，与其他固体废弃物如餐厨垃圾协同，不仅增加了路线的稳定性、容错性，也提高了产品产量和经济效益<sup>[30]</sup>。单独焚烧无经济效益，其次为水泥窑协同处置，为 24 元·t<sup>-1</sup>。

综合来看，土地利用路线成本高效益高，同时具有容错性较高、有能量回收单元和环境友好的优点，而建材利用成本低效益也低。综合考虑成本、经济效益以及环境友好原则，市政污泥处理处置建议土地利用为主，建材利用为辅。但具体应用到城市，还

表 6 市政污泥处置经济效益

Table 6 Economic benefits of municipal sludge disposal

| 处置方式        | 经济效益/(元·t <sup>-1</sup> ) |
|-------------|---------------------------|
| 餐厨协同厌氧-土地利用 | 255                       |
| 好氧-土地利用     | 100                       |
| 砖窑协同处置      | 78                        |
| 水泥窑协同处置     | 24                        |

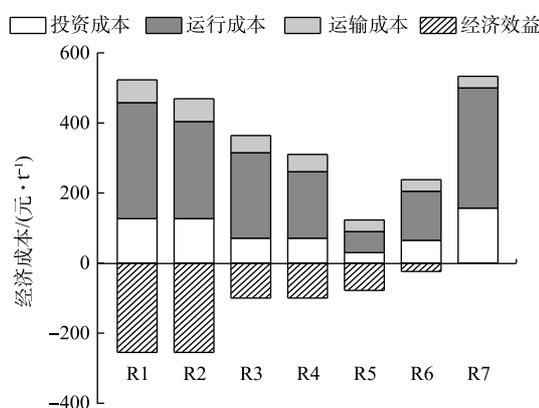


图 2 市政污泥处理处置各路径成本

Fig. 2 Costs for each path of municipal sludge treatment and disposal

是需要因地制宜,在已有设施和产业情况的基础上进行处理处置路线制定。

## 2.2 敏感性分析

1) 产业布局敏感性。基于敏感性分析方法,对产业布局以及土地利用季节性、建材产业生产波动等关键因素进行了市政污泥生命周期成本敏感性分析。

产业布局敏感性分析路线见图3。产业布局主要受运输成本和运行成本影响。运输成本由污泥运载量和运输距离决定,污泥含水率是污泥处理处置的一个关键指标。因此,有必要分析污泥含水率和运输距离对污泥处理处置成本的影响趋势。

以合肥某污泥厌氧消化项目为例分析污泥含水率和运输距离对污泥处理处置成本的影响趋势。该项目投资成本为 $1.5 \times 10^8$ 元,城市污泥日处理量约为600 t,经过厌氧消化产生沼渣约300 t,离心脱水后的湿沼渣含水率约为78%,进一步经干化后形成的干沼渣含水率可降至5%。以含水率80%污泥计,污泥干化的热耗为 $2\ 940 \sim 4\ 200$   $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,电耗为 $0.04 \sim 0.90$   $(\text{kW} \cdot \text{h}) \cdot \text{kg}^{-1}$ 。若以每吨蒸汽价格190元计,每降低1%含水量,需要蒸汽0.016 t,每吨蒸汽190元,折合污泥干化运行成本 $3.04$   $\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$ 。干化后含水率上限取决于各污泥利用路线含水率限值,见表7。

对于土地利用路线,假设污水处理厂到污水处理处置中心的距离为 $S_1$ ,污水处置中心到土地的距离为 $S_2$ 。假设园林利用时 $S_1 + S_2 = 50$  km,林地利用时 $S_1 + S_2 = 100$  km。对于建材利用路线,假设污水处理厂到污水处理处置中心的距离为 $S_1$ , $S_1 \leq 50$  km。生命周期成本计算具体见式(5)~式(7)。

$$C = C' + C_r + C_t \quad (5)$$

式中: $C$ 为单位成本, $(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$ ;  $C'$ 为未考虑干化运行成本和污泥运输成本的单位成本, $\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

$$C_r = \frac{R}{1 - M} \quad (6)$$

式中: $R$ 为湿污泥干化运行成本, $(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$ ;  $M$ 为污水处理厂处理后污泥含水率,%。

$$C_t = C_{t1} + C_{t2} \quad (7)$$

式中: $C_{t1}$ 为污水处理厂到污泥处理处置中心的运输成本, $(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$ ;  $C_{t2}$ 为污泥处理处置中心到土地的运输成本, $\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

各处置路线产业布局敏感性分析结果如图4所示。综合来看,污泥处置阶段脱水程度越低,则污泥的处置成本越低。对于土地利用路线,在湿污泥总量相同的情况下,虽然脱水程度越低意味着更大的运载量及更高的运输成本,但并不会影响总成本随脱水程度变化的趋势。对于建材利用路线,由于只有污水处理厂到污泥处置中心这一段运输距离,在污泥含水率一定的情况下,二者距离越近成本越低。

总的来说,在保证污泥处置含水率达标的前提下,污泥含水率越高,则成本越低;在总运输距离一定的情况下,污泥处理处置中心离污水处理厂越近,则成本越低。

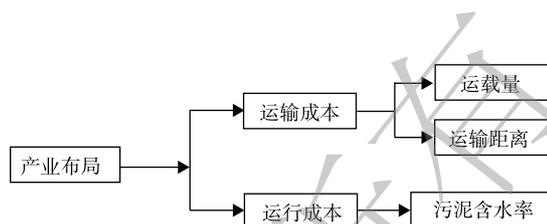


图3 产业布局敏感性分析路线

Fig. 3 Industry layout sensitivity analysis route

表7 污泥处置含水率限值<sup>[31-34]</sup>

Table 7 Water content of sludge disposal<sup>[31-34]</sup>

| 污泥处置工艺 | 含水率限值/%   |
|--------|-----------|
| 林地利用   | $\leq 60$ |
| 园林利用   | $\leq 40$ |
| 制砖     | $\leq 40$ |
| 制水泥    | $\leq 35$ |

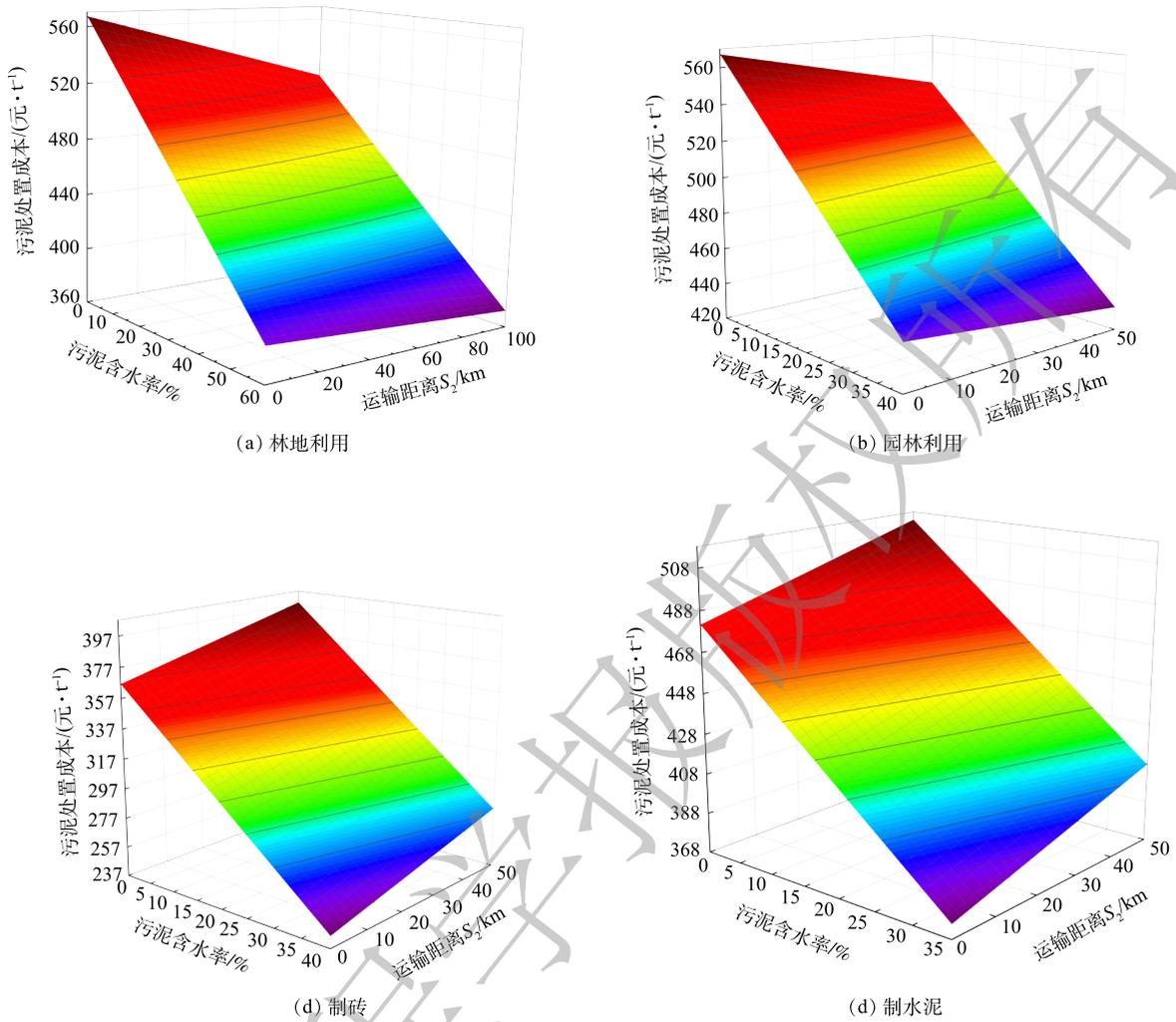


图 4 不同处置路线产业布局敏感度

Fig. 4 Industry layout sensitivity of different disposal routes

2) 土地利用季节性、建材产业生产波动敏感性分析。由于污泥土地利用消纳量随季节波动、建材利用消纳量随建材市场需求量波动，污泥产品需要在销售淡季进行临时储存，这主要影响了项目前期设计占地及厂房建设部分的费用，从而导致项目初始投资成本增加。投资成本与污泥产品临时储存量关系具体见式(8)~式(9)。

$$C_i = \frac{C_{i1} + C_{i2}}{N_1} \tag{8}$$

式中： $C_i$ 为投资成本，元· $t^{-1}$ ； $C_{i1}$ 为项目投资成本，元； $C_{i2}$ 为污泥产品临时储存投资成本，元； $N_1$ 为污泥处置规模， $t$ 。

$$C_{i2} = N_2 \times M \tag{9}$$

式中： $N_2$ 为污泥产品临时储存仓库面积， $m^2$ ； $M$ 为单位面积仓库建设成本，元· $m^{-2}$ 。

以镇江市餐厨污泥协同处理一期项目、九江市餐厨污泥协同处理项目、重庆万州污泥无害化处理及资源化利用项目、日照市超高温好氧发酵项目、曲阜中联水泥窑无害化协同处置污泥项目以及广州市珠江水泥有限公司污泥干化协同处置工程为例<sup>[35]</sup>，探究了污泥土地利用季节性、建材产业生产波动导致的污泥处置成本波动趋势。

镇江市餐厨污泥协同处理一期项目的污泥处理处置方式为餐厨协同厌氧消化,项目总投资 $1.65 \times 10^8$ 元,日处理综合有机废弃物共计260 t,其中餐厨垃圾140 t、城市污泥120 t,主要污泥产品为沼气、液体有机肥以及生物炭土等。重庆市丰都县规模化生物能源工程的污泥处理处置方式为厌氧消化,项目总投资 $1.01 \times 10^8$ 元,日处理综合有机废弃物共计500 t,其中餐厨垃圾100 t、城市污泥100 t,主要产品为沼气、液体有机肥以及固体有机肥,1年污泥固、液体产品约 $6 \times 10^4$  t。重庆市万州污泥无害化处理及资源化利用项目的污泥处理处置方式为高温好氧发酵,项目投资 $7200 \times 10^4$ 元,处理规模 $200 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 湿污泥(含水率80%),1年污泥产品约 $5 \times 10^4$  t。日照市超高温好氧发酵项目总投资 $3000 \times 10^4$ 元,日处理能力 $120 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 湿污泥(含水率80%),主要污泥产品为有机肥。曲阜中联水泥窑无害化协同处置污泥项目总投资 $1.62 \times 10^7$ 元,设计利用曲阜中联2条日产2500 t旋窑生产线处理污泥,现阶段共接纳曲阜市2座污水处理厂的污泥,日处理量为 $40 \sim 50 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 。广州市珠江水泥有限公司污泥干化协同处置工程投资约 $3000 \times 10^4$ 元,依托熟料生产线规模为 $5000 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ,污泥处理设计规模为 $300 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 。考虑到水泥易受潮变质,干燥环境下保质期一般为2~3个月,潮湿环境下一般不超过15 d,敏感度计算中水泥临时储存量按2个月计。6个项目污泥处置成本对污泥临时储存量的敏感度见图5及表8。

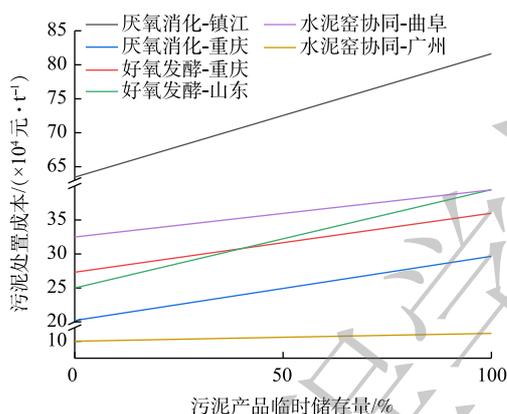


图5 污泥产品临时储存量敏感度

Fig. 5 Sensitivity of temporary storage volume of sludge products

表8 污泥产品临时储存量敏感度

Table 8 Sensitivity of temporary storage volume of sludge products

| 污泥处置项目   | 敏感度/% |
|----------|-------|
| 厌氧消化-镇江  | 28.6  |
| 厌氧消化-重庆  | 24.8  |
| 好氧发酵-重庆  | 31.8  |
| 好氧发酵-山东  | 57.8  |
| 水泥窑协同-曲阜 | 21.4  |
| 水泥窑协同-广州 | 11.6  |

综合来看,水泥窑协同处置路线的成本对污泥产品临时储存量的敏感度最低。主要原因是由于水泥特性易受潮,不宜长期储存,其临时储存时间不应超过3个月,并且与土地利用产品(有机肥等)相比水泥产品密度较大,因此大幅降低了临时储存厂房建设的投资成本。同时,对比两个水泥窑协同处置项目,发现成本和敏感度变化较大。这是由于原水泥窑生产线和协同处置工艺不同,水泥窑协同处置工程的投资成本和处置规模会有较大波动。曲阜中联水泥窑无害化协同处置污泥项目工艺流程为含水率80%的污泥直接进入水泥窑焚烧,焚烧后灰渣直接作为无机原料用于生产水泥,导致污泥处理规模小,设计规模 $100 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ,实际仅有 $50 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 。而广州市珠江水泥有限公司污泥干化协同处置工程采用深度脱水-电热干化-水泥窑技术路线,污泥处理规模可达 $300 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ,降低了成本和敏感度。因此,对于建材利用路径,污泥处置规模较小的工程无法全量处置整座城市的污泥,一般是作为污泥处置项目的补充,可以不设置临时储存厂房;而污泥处置规模较大的工程可以考虑设置产品临时储存厂房,但受到产品储存时间限制,面积不宜设置过大。

对于土地利用路线,厌氧消化项目污泥对污泥产品临时储存量较不敏感。这可能由于厌氧消化项目产品丰富且沼气产品占比较大,固液体产物占比较小,因此所需储存空间少,从而导致污

泥处置成本对污泥产品临时储存量较不敏感。重庆市厌氧消化项目处置成本在4个污泥处置项目中最低，这可能由于重庆市丰都县规模化生物天然气工程是一个综合性生物质能源工程，综合处理有机废弃物包括餐厨垃圾、城市污泥以及尾菜、畜禽粪污、秸秆等有机垃圾，处理规模大，降低了每吨污泥的处置成本。而2个好氧发酵项目处置成本较高，虽然两者总投资成本均显著低于厌氧消化项目，但污泥处置规模小，无法综合协同处理多种有机废弃物(例如餐厨垃圾、污泥协同处置)，导致污泥单位处置成本升高。并且由于好氧发酵项目处置废弃物类型单一，污泥产品中有有机肥料占比大，好氧发酵项目成本对污泥产品临时储存量敏感。一旦污泥产品消纳端产生需求波动，污泥产品临时储存量也会迅速波动。因此，对于好氧发酵项目，污泥产品临时储存仓库的设置虽然增加了项目前期的投资成本，但有一定必要性。

### 3 结论

1) 典型市政污泥的处理处置路径中，土地利用路径生命周期成本为310~523元·t<sup>-1</sup>，经济效益为100~255元·t<sup>-1</sup>，具有成本与效益并存、容错性较高、有能量回收单元和环境友好的特点；建材利用的生命周期成本为123~238元·t<sup>-1</sup>，经济效益为24~78元·t<sup>-1</sup>。

2) 综合考虑成本、经济效益以及环境友好原则，市政污泥处理处置路线建议以土地利用为主，建材利用为辅。但落实到具体城市时需要因地制宜，在已有设施和产业情况的基础上进行处理处置路线制定。

3) 在保证污泥处置含水率达标的前提下，污泥含水率越高，成本越低；在总运输距离一定的情况下，污泥处理处置中心离污水处理厂越近，成本越低。

4) 水泥窑协同处置项目和厌氧消化-土地利用项目的污泥处置成本对污泥产品临时储存量的敏感度较低，为11.6%~28.6%，故不建议设置较大的储存仓库；好氧发酵-土地利用项目的污泥处置成本对污泥产品临时储存量的敏感度较高，超过30%，故有必要设置储存仓库以稳定成本波动。

### 参考文献

- [1] 卢纯.“共抓长江大保护”若干重大关键问题的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 283-295.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2020年中国城乡建设统计年鉴[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [3] 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.
- [4] 戴晓虎. 我国城镇污泥处理处置现状及思考[J]. 给水排水, 2012, 48(2): 1-5.
- [5] 柴宝华, 李文涛, 元伟, 等. 我国市政污泥处理处置现状研究[J]. 新能源进展, 2023, 11(1): 38-44.
- [6] E20研究院. 2020中国污泥处理处置行业市场分析报告[R]. 中国水网/中国固废网研究, 2020.
- [7] 魏子凯, 杨昂超, 张文学, 等. 市政污泥处置研究进展[J]. 云南化工, 2021, 48(12): 4-7.
- [8] 李国, 覃福京, 覃柳娟, 等. 浅谈我国市政污泥来源特性及处理处置现状[J]. 广东化工, 2023, 50(2): 107-108.
- [9] 戴晓虎, 张辰, 章林伟, 等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J]. 给水排水, 2021, 57(3): 1-5.
- [10] 段妮娜, 王逸贤, 王磊, 等. 我国污泥处理处置主流技术路线的发展概况及制约因素[J]. 城市道桥与防洪, 2019(11): 86-89.
- [11] E20研究院. 2021中国污泥处理处置市场分析报告[R]. 中国水网/中国固废网研究, 2021.
- [12] 李爽, 章林伟. 我国城镇污水价格机制初探与建议[J]. 给水排水, 2021, 57(1): 38-40+48.
- [13] 刘洪涛, 张悦. 国情背景下我国城镇污水厂污泥土地利用的瓶颈[J]. 中国给水排水, 2013, 29(20): 1-4.
- [14] 刘爽, 白锡庆, 张鹏宇, 等. 我国城市污泥建材资源化利用的问题及对策[J]. 砖瓦, 2015(6): 43-47.
- [15] 董峙标, 乔波, 徐飞. 我国污水处理厂污泥处理现状分析——以大连夏家河污水处理厂为例[J]. 节能, 2012, 31(4): 4-6.
- [16] 单连斌, 王允妹. 沈阳市城市污水处理厂现状及提标改造技术对策分析[J]. 环境保护科学, 2017, 43(2): 19-23.
- [17] 侯晓峰, 薛惠锋. 城镇污水污泥土地利用风险及收益-成本分析[J]. 西安工业大学学报, 2011, 31(2): 199-204.
- [18] COROMINAS L, FOLEY J, GUEST J S, et al. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art[J]. Water Research, 2013, 47(15): 5480-5492.
- [19] LAM C, YU I K, MEDEL F, et al. Life-cycle cost-benefit analysis on sustainable food waste management: The case of Hong Kong International Airport[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 187: 751-762.
- [20] LI H, JIN C, MUNDREE S G, et al. Hybrid Environmental And Economic Assessment Of Four Approaches Recovering Energy From Sludge With Variant Organic Contents[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 153: 131-138.
- [21] XU C, CHEN W, HONG J, et al. Life-cycle Environmental And Economic Assessment Of Sewage Sludge Treatment In China[J]. Journal of Cleaner Production. 2014, 67: 79-87.

- [22] 池勇志, 迟季平, 马颜, 等. 城镇污水污泥性质与处理处置概况[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(S2): 169-172.
- [23] 桑光明. 城市污水污泥处理处置综合比较分析[D]. 深圳大学, 2015.
- [24] 冯俊亨, 盛守祥, 冯连顺, 等. 典型污泥处置技术性能及经济性对比分析[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(6): 90-92.
- [25] 江子箫, 陈晓平, 杨叙军, 等. 城市污泥深度脱水-热干化-焚烧系统经济性分析[J]. 发电设备, 2017, 31(6): 426-432.
- [26] 刘敬勇, 李晓瑜, 梁凯云, 等. 广州市污泥处理处置技术路线及其经济性分析[J]. 广东工业大学学报, 2016, 33(5): 87-92.
- [27] 刘杰, 郑西来, 高超, 等. 城镇污水处理厂用地、运行及建设费用研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(11): 2522-2526.
- [28] 王彬全, 麻红磊, 金余其, 等. 污泥干化焚烧过程中的能量平衡及经济性分析[J]. 热力发电, 2010, 39(7): 14-17.
- [29] 潘洞, 杨学权, 刘渊. 污泥改性脱水和水泥窑协同处置新工艺介绍及经济和环保性评价[J]. 水泥, 2011(7): 1-8.
- [30] 郝晓地, 唐兴, 曹达啓. 剩余污泥厌氧共消化技术研究现状及应用趋势[J]. 环境工程学报, 2016, 10(12): 6809-6818.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇污水处理厂污泥处置林地用泥质: CJ/T 362-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇污水处理厂污泥处置水泥熟料生产用泥质: CJ/T 314-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [33] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准管理委员会. 城镇污水处理厂污泥处置园林绿化用泥质: GB/T 23486-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [34] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准管理委员会. 城镇污水处理厂污泥处置制砖用泥质: GB/T 25031-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [35] 长江生态环境工程研究中心上海勘测设计研究院. 污泥处理处置与资源化发展现状评估报告(2019)[R].

(责任编辑: 金曙光)

## Economic analysis and evaluation of municipal sludge treatment and disposal technology

WANG Junyi<sup>1,2</sup>, CHEN Wei<sup>1,3,\*</sup>, WU Yuanzhu<sup>1,3</sup>, HE Xiaowei<sup>1,3</sup>, LUO Yang<sup>1,3</sup>, YAN Yingying<sup>1</sup>, ZHANG Yuchen<sup>1</sup>, XIONG Zhuo<sup>2</sup>, ZHAO Yongchun<sup>2</sup>

1. Changjiang Ecological and Environmental Protection Group Co., Ltd, Wuhan 430010, China; 2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Changjiang Qingyuan Energy Conservation and Environmental Protection Co., Ltd, Shanghai 200000, China

\*Corresponding author, E-mail: chen\_wei27@ctg.com.cn

**Abstract** Aiming at the problem of difficult choice of technology routes due to the complexity of sludge treatment and disposal costing, different technology routes of municipal sludge land and building materials resource utilization paths are evaluated from an economic perspective, in order to help decision makers weigh the choice of different sludge treatment and disposal whole process chains. Typical technical routes for municipal sludge treatment and disposal were evaluated through the life cycle cost method, and the dynamic response mechanism of industrial layout, land use seasonality, production fluctuation of building materials industry and sludge treatment and disposal cost was explored by sensitivity analysis method. The results of the life cycle cost evaluation show that the life cycle cost of the land use route is 310 CNY·t<sup>-1</sup>~523 CNY·t<sup>-1</sup>, and the economic benefit is 100 CNY·t<sup>-1</sup>~255 CNY·t<sup>-1</sup>. The life cycle cost of the building material application is 123 CNY·t<sup>-1</sup>~238 CNY·t<sup>-1</sup>, and the economic benefit is 24 CNY·t<sup>-1</sup>~78 CNY·t<sup>-1</sup>. Comprehensive life-cycle cost, economic benefit and green low-carbon principle, the municipal sludge treatment and disposal route should be mainly land use and building material use. The results of sensitivity analysis show that, on the premise of ensuring the water content of sludge disposal to meet the standard, reducing the sludge dewatering rate and shortening the transportation distance from sewage treatment plant to sludge treatment and disposal center are beneficial to reduce the cost. The sludge disposal cost of the aerobic fermentation-land use project has the highest sensitivity of over 30% to the temporary storage volume of sludge products, making it necessary to set up storage warehouses to stabilize the cost fluctuation. The study has reference significance for optimizing the path of municipal sludge resource utilization and industrial layout.

**Keywords** municipal sludge; treatment and disposal; economic evaluation; life cycle cost; sensitivity analysis