

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.13.004

# 机械扰动与碳基骨架原位强化污泥太阳能干化

颜莹莹<sup>1,2</sup>, 满高智<sup>2</sup>, 何智<sup>2</sup>, 倪涛<sup>1</sup>, 金明灏<sup>2</sup>, 王瞢遇<sup>1</sup>,  
王超<sup>3</sup>, 刘欢<sup>2</sup>

(1. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430014; 2. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 重庆市三峡生态环境技术创新中心有限公司, 重庆 401329)

**摘要:** 在太阳能干化过程中, 污泥易发生严重的收缩、结壳现象, 导致干化效率低下。为此, 在实际阳光棚中探索了机械扰动与碳基骨架掺混对污泥太阳能干化过程的原位强化作用。结果表明, 机械扰动可缓解结壳效应, 促进污泥水分释放, 从而缩短干化时长, 每日一次扰动可使干化时长减少49.3%。碳基骨架掺混能在机械扰动的基础上进一步提高干化效率, 污泥含水率降幅最高可达18.7%。在机械扰动和骨架掺混的协同作用下, 污泥干化终点的有机质含量有所提高, 产物呈中性, 有利于后续应用。

**关键词:** 污泥; 太阳能干化; 机械扰动; 碳基骨架

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)13-0026-07

## Enhanced Solar Drying of Sewage Sludge Using Mechanical Disturbance and Carbonaceous Skeleton Blending

YAN Ying-ying<sup>1,2</sup>, MAN Gao-zhi<sup>2</sup>, HE Zhi<sup>2</sup>, NI Tao<sup>1</sup>, JIN Ming-hao<sup>2</sup>,  
WANG Man-yu<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>3</sup>, LIU Huan<sup>2</sup>

(1. Yangtze Ecology and Environment Co. Ltd., Wuhan 430014, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Chongqing Three Gorges Eco-Environment Technology Innovation Center Co. Ltd., Chongqing 401329, China)

**Abstract:** In the process of sludge solar drying, serious shrinkage and crusting phenomenon are prone to occur, resulting in low drying efficiency. In this paper, the in-situ strengthening effects of mechanical disturbance and carbonaceous skeleton blending on the sludge solar drying process were explored in an actual solar canopy. The results showed that mechanical disturbance could alleviate the crusting effect and promote the release of internal water. The drying time was reduced by 49.3% with disturbance once per day. Carbonaceous skeleton blending could further improve the drying efficiency on the basis of mechanical disturbance, and the moisture content of sludge was reduced by up to 18.7%. Under the synergistic effect of mechanical disturbance and skeleton blending, the organic matter content at the end point of sludge drying was increased, with neutral pH value, which was conducive to the

基金项目: 长江生态环保集团有限公司科研项目(HBAH2023012)

通信作者: 刘欢 E-mail: huanliu@hust.edu.cn

application of subsequent products.

**Key words:** sewage sludge; solar drying; mechanical disturbance; carbonaceous skeleton

污泥是污水处理过程中伴生的副产物。2023年城乡统计年鉴表明,我国的污泥年产量已突破 $8\,000\times 10^4$  t,其处理处置和利用面临巨大挑战。然而原污泥含水率高达97.0%~99.5%,不仅增加了储存和运输的负担,而且无法满足后续焚烧、土地利用等技术要求<sup>[1-2]</sup>。尽管当前研究了许多新型调理方法,如高级氧化和电渗透等,但在实际工程中,污泥调理仍主要依赖混凝剂/絮凝剂处理,随后通过离心机或带式压滤机等设备脱水,脱水后的污泥含水率通常在80%左右,仍需要通过热干化技术进一步去除水分。常规污泥热干化多采用热泵、废热蒸汽、导热油等作为热源<sup>[3-4]</sup>,耗电量高达800~1 060 kW·h/t。与此相比,太阳能干化技术利用阳光作为热源,耗电量仅为20~100 kW·h/t,具有成本低、操作维护简单等优点,特别适用于辐照强度较高的地区<sup>[5]</sup>。

在实际污泥太阳能干化过程中,干化效率偏低和出泥含水率不稳定是普遍存在的共性问题。其根本原因在于静态干化过程中,污泥易收缩结团,导致孔隙结构闭锁,内部水分向外扩散蒸发的阻力显著增加。针对该现象,研究者在以废热蒸汽或导热油作为热源的干化设备中,通过设计转盘或桨叶实现污泥的机械扰动,从而增加污泥的暴露面积,强化传热传质。课题组的前期研究也表明,将生物质废弃物等碳基骨架掺混至污泥中,可以重构污泥固液分离过程中水分的过滤通道,加速内部水分的排出<sup>[6-8]</sup>。为进一步验证机械扰动和碳基骨架在实际污泥太阳能干化过程中的应用效果,开展了阳光棚干化实验,系统考察了机械扰动和碳基骨架掺混对污泥干化效率和产物特性的影响,以期在实际生产过程中干化工艺的提质增效提供参考。

## 1 工程概况

在我国南方某市污水处理厂开展研究。该厂处理能力为280 t/d(以含水率为80%计),其中一期和二期规模均为140 t/d,具体工艺路线如图1所示。污泥的太阳能干化过程在总建筑面积达20 812.8 m<sup>2</sup>的大型轻钢结构玻璃阳光棚内进行,该棚共有6跨,内部无隔断。根据美国国家航空航天局

(NASA)提供的最新数据,1984年—2019年期间,该地区各月的日均太阳辐射量介于1.25~6.14 kW·h/(m<sup>2</sup>·d),波动幅度较大。在干化棚内,每跨均铺设约20 cm厚的污泥层,单跨可承载污泥约700 t。

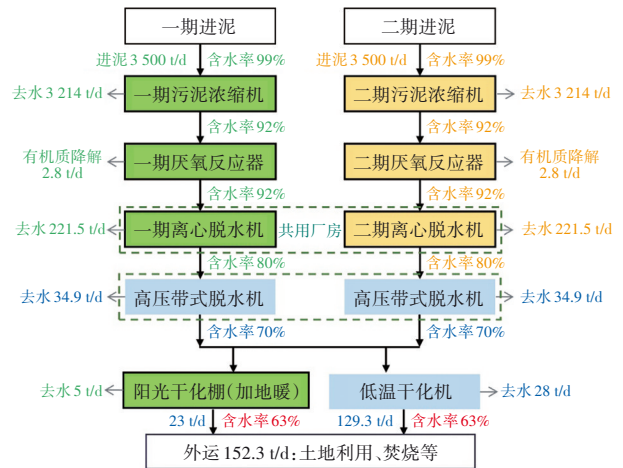


图1 污泥处理工艺路线

Fig.1 Process of sludge treatment

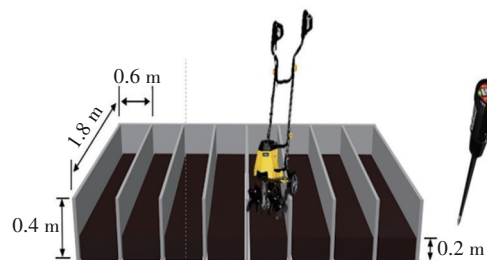
## 2 实验材料及方法

### 2.1 实验材料

为了严格控制实验条件,确保实验与生产过程的变量水平一致,选择在6号阳光棚内开展现场实验,其场地布局如图2所示。



a. 阳光棚



b. 实验区域示意

图2 现场实验场地

Fig.2 Experimental site

通过塑料挡板将污泥分隔为若干实验区域,每个区域为1.8 m × 0.6 m的长方形,铺设的泥层厚度与实际运行条件保持一致,约为20.0 cm。实验所用污泥为离心脱水机当日产生的新鲜污泥样品,每个区域每次使用污泥量为100.0 kg。污泥含水率为80.14%,干基有机质含量为52.32%,干基灰分含量为47.68%,C、H、O、N、S的质量分数分别为27.89%、4.28%、14.16%、5.25%、0.74%。为模拟

$$m = \frac{w_{s0} \times 0.10 + w_{m0} \times 0.45 + w_{b0} \times 0.45 - (w_{s1} \times 0.10 + w_{m1} \times 0.45 + w_{b1} \times 0.45)}{w_{s0} \times 0.10 + w_{m0} \times 0.45 + w_{b0} \times 0.45} \quad (1)$$

式中: $w_{s0}$ 、 $w_{m0}$ 、 $w_{b0}$ 分别为表、中、底层污泥样品初始质量; $w_{s1}$ 、 $w_{m1}$ 、 $w_{b1}$ 分别为表、中、底层污泥样品烘干后质量;系数0.10、0.45、0.45根据现场情况中三种状态污泥的质量比确定。

根据对污泥厂周边碳基骨架原料现状的调研,选取了4种产量充足的生物质废弃物粉料(水稻秸秆、玉米秸秆、稻壳和竹粉)作为碳基骨架进行掺混实验。碳基骨架的组分特性如表1所示。考虑到技术经济性、可行性以及预实验结果,掺混比例设置为污泥干基质量的10%、粒径为1~10 mm。

表1 碳基骨架的组分特性

Tab.1 Composition characteristics of carbonaceous skeleton

项目	水分/%	灰分/%	挥发分/%	固定碳*/%	低位热值/(MJ·kg <sup>-1</sup> )
玉米秸秆	6.11	4.73	76.15	13.01	14.67
水稻秸秆	3.64	12.18	67.84	16.34	14.90
稻壳	5.61	17.82	62.63	13.94	16.78
竹粉	6.67	5.75	78.32	9.26	20.27

注: \*表示数据由差减得出。

## 2.2 分析项目及方法

样品的含水率采用重量法测定,参照《城市污水处理厂污泥检验方法》(CJ/T 221—2005)进行。根据每日测得的样品含水率,计算其水分质量,并通过质量变化与时间的比值来确定不同组别的水分释放速率。有机质含量同样采用重量法进行测定。pH采用电极法进行测定,样品经过振荡离心处理后,取其上清液,用pH分析仪进行测定。现场温湿度变化通过温湿度仪进行记录。每天在固定高度(1.0 m)处对污泥表面形貌进行图像采集,并使用ImageJ软件的Analyze Particles功能对污泥粒径进行分析。

生产环境中的翻耙机装置,采用手持式电动翻抛机进行机械扰动,频率为0~2次/d,并尽量避免扰动死角。实验期间,平均日照时间为13.65 h,每日固定时间记录阳光棚内实验区的温度和湿度。每天同一时间从每个实验区域的表层、中层(泥层高度的一半)和底层各取3组平行样品,每份样品质量为100.0 g。总含水率( $m$ )根据式(1)通过水分质量折算得到。

## 3 结果与讨论

### 3.1 阳光棚中污泥的干化特性

图3为不同时间段阳光棚的运行数据。出泥含水率在40%~80%内波动,日蒸发能力仅为5~45 t/d,与设计日均蒸发能力(74 t/d)存在显著差距。进一步采集表层、中层和底层污泥样品进行含水率测定,结果表明,在3月份,表层、中层和底层含水率分别为39.5%、71.5%、75.1%,平均为70.4%,标准差为19.7%;在6月份,表层、中层和底层含水率分别为23.6%、68.0%、69.8%,平均为65.0%,标准差为26.1%;在8月份,表层、中层和底层含水率分别为24.1%、50.0%、71.1%,平均为59.4%,标准差为23.5%。可见,表层污泥在各季节的含水率显著低于总体平均含水率,且各层污泥含水率的标准差较高,表明表层污泥较其他区域更易干化。相反,底层污泥由于长期位于机械扰动的死角,干化效果较差,其含水率始终维持在约70%的高水平。

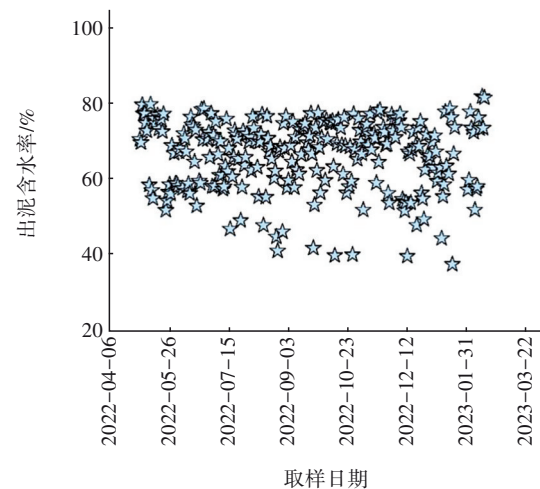
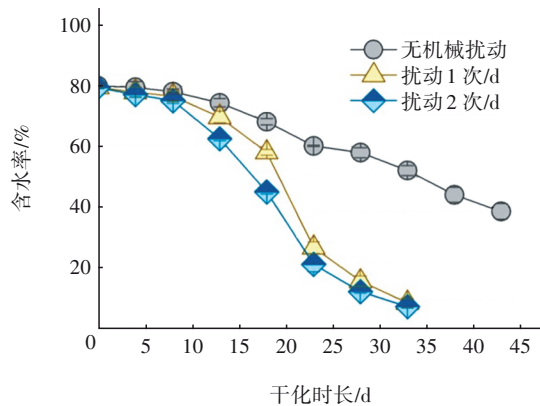


图3 阳光棚出泥含水率

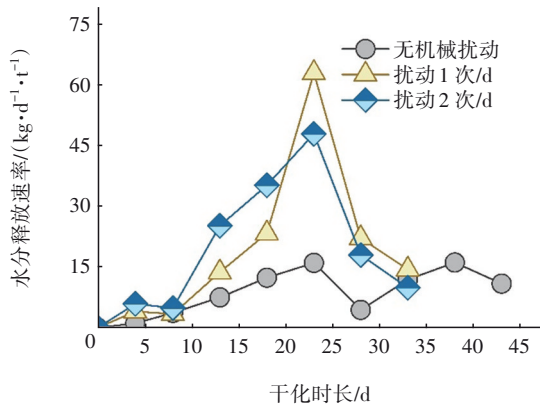
Fig.3 Moisture content of sludge discharged from solar drying greenhouse

### 3.2 机械扰动对污泥干化过程的影响

对实验周期内现场环境温度和湿度进行了监测,其中温度在24~45℃之间波动,湿度范围为50%~90%,整体处于相对低温高湿的状态。在无机机械扰动的条件下,污泥含水率的下降速度较慢,直至第43天含水率才降至40%;而在机械扰动作用下,由于破坏了污泥表层的结壳结构并重新均匀了水分分布,污泥含水率显著加速下降,且在后续干化过程中,含水率持续快速降低。同时,扰动频次的增加进一步提高了含水率下降速度,尤其是在含水率处于20%~70%的区间,直到后期,扰动频次的增加对含水率变化的影响趋于平稳,扰动频次为1次/d与2次/d的结果趋于一致,见图4(a)。



a. 污泥含水率变化



b. 水分释放速率变化

图4 机械扰动条件下污泥水分释放规律

Fig.4 Moisture releasing behavior of sludge under mechanical disturbance conditions

由图4(b)可知,水分释放速率在干化第8天后出现显著差异,机械扰动组特别是当扰动频次为2次/d时,在干化初期水分释放速率显著提高,明显高于其他组别,表明在干化初期,水分释放速率对机

械扰动反应更为敏感。较高的机械扰动频率有助于加速间隙水和表面水的脱除过程。随着干化时间延长,三个组别的水分释放速率几乎同时达到峰值,其中扰动频次为1次/d的组别峰值最高。峰值过后,机械扰动组的水分释放速率明显下降,原因在于污泥中水分逐渐减少,机械扰动组的干化过程进入降速阶段。当污泥含水率低于20%时(约27 d后),水分释放速率放缓。若以阳光棚设计出泥含水率40%为干化终点,扰动1次/d和扰动2次/d使污泥干化时长分别缩减至无机机械扰动条件下干化时长的50.7%与47.4%。

图5展示了机械扰动对污泥平均粒径及宏观形貌的影响。在无机机械扰动的静态干化过程中,污泥收缩结团,平均粒径不断增大,表面“壳”结构显著增加了污泥水分向外扩散蒸发的阻力。而引入机械扰动后,污泥初始形态不变,5 d后粒径开始不断减小,与无扰动状态污泥粒径差值持续增大。但扰动频次的增加对平均粒径的影响不显著。由此分析可知,机械扰动通过打散污泥中的团聚颗粒,增加了颗粒与空气的接触面积,提升了空气流通性,从而有助于水分从污泥层各处扩散至空气中,避免了表层水分蒸发快、内部水分蒸发慢引起的结壳包裹效应。此外,污泥颗粒在搅拌、撞击和挤压作用下不断破碎,进一步促进了干化过程的进行。

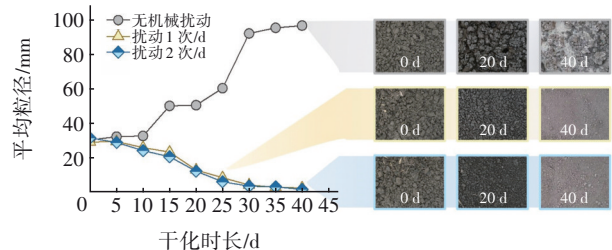


图5 机械扰动条件下污泥粒径的变化

Fig.5 Particle size variation of sludge under mechanical disturbance conditions

### 3.3 碳基骨架掺混对污泥干化的强化作用

选择4种生物质废弃物粉料作为碳基骨架进行掺混实验,测定了不同时段污泥含水率,并计算了水分释放速率,将实验结果与未添加骨架的污泥组(对应不同机械扰动频次)进行差减分析,结果如图6所示(以掺混玉米秸秆为例)。在干化初始,掺混玉米秸秆的污泥含水率下降了1.9%。根据理论计算,掺混碳基骨架后,混合污泥的干基总量增加

了约 10%，因此其含水率会因“稀释效应”下降约 1.5%。这表明，初始含水率的差异主要由“稀释效应”引起。进一步分析图 6(a)和(b)可以发现，掺混玉米秸秆后，无机械扰动组在干化初期含水率略有下降，但在 14 d 后，含水率出现了反弹。这一现象可归因于玉米秸秆孔道结构发达，混合后在静态条件下可能会吸收部分污泥中的水分，从而形成一定的保水作用，导致整体水分释放速率减缓。在机械扰动条件下，掺混玉米秸秆能进一步降低污泥的含水率。特别是在扰动频次为 1 次/d 的情况下，第 17 天时含水率下降幅度达到 10%。随着污泥中水分的逐渐减少，水分释放速率逐渐降低，这与未掺混骨架的扰动组别规律类似。

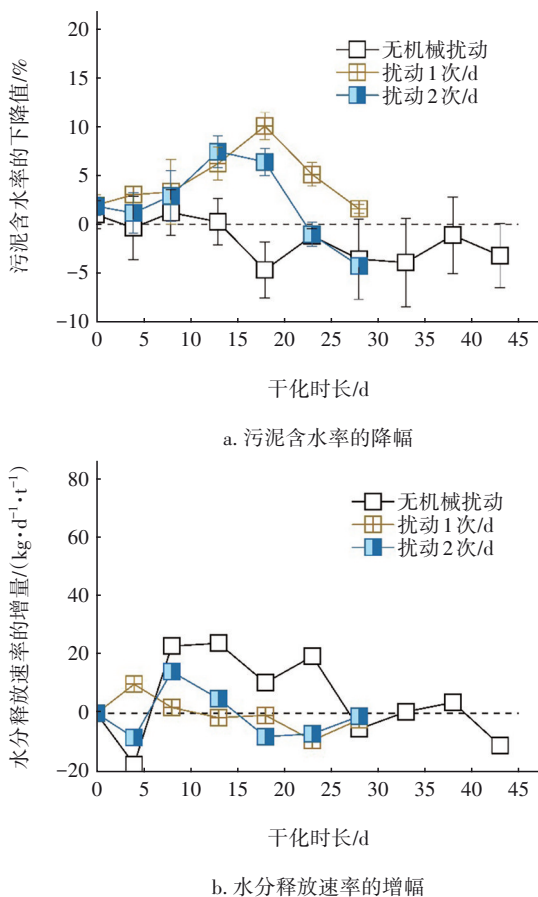


图 6 掺混玉米秸秆对污泥干化的影响

Fig.6 Effect of carbonaceous skeleton on sludge drying

掺混碳基骨架种类对污泥干化的影响见图 7。由图 7(a)可知，4 种碳基骨架均能在机械扰动基础上进一步强化干化。即使将初始(0 d)下降值归因于骨架“稀释效应”和不可避免的取样误差，污泥含水率降幅仍是显著的，且呈现出不断增大的趋势，

最高可达 18.7%。根据图 7(b)所示，掺混不同骨架后，污泥干化速率均表现出明显的提升且趋势一致。因此，可根据季节性产量的变化，交替使用不同的碳基骨架。

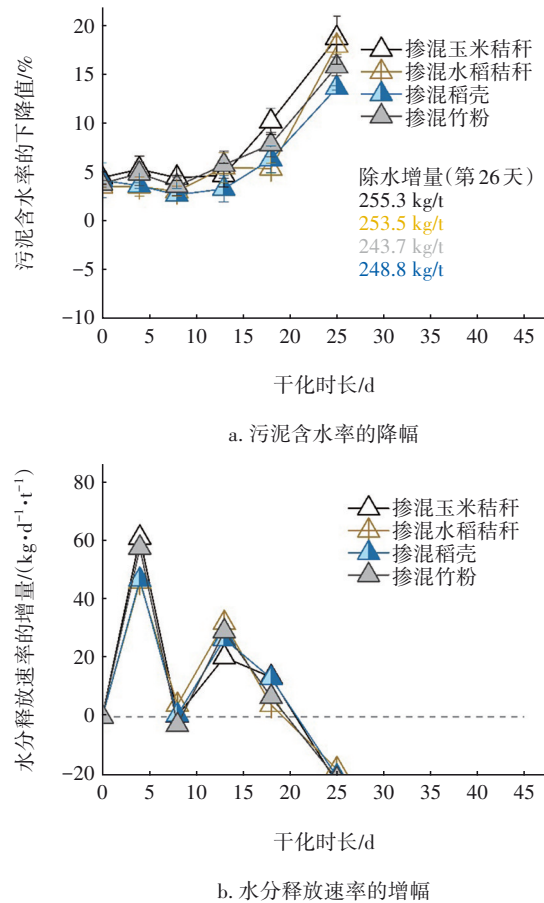


图 7 掺混碳基骨架种类对污泥干化的影响

Fig.7 Effect of types of carbonaceous skeleton on sludge drying

### 3.4 机械扰动对污泥有机质含量及 pH 的影响

干化产物可在土地利用过程中作为肥料，其有机质含量直接影响园林绿化的效果。同时，干化产物在焚烧过程中作为燃料，其有机质含量决定了能量回收的效率。在干化初期，各组别的有机质含量基本相同。无机械扰动的污泥有机质含量受微生物活动和水分蒸发的影响较小，在干化末期该组别污泥的有机质含量均值为 52.0%，与初期的 52.4% 相比无明显变化。机械扰动组的有机质含量呈现出轻微下降的趋势，至第 45 天，扰动 1 次/d 组的有机质含量降至 51.2%，而扰动 2 次/d 组的有机质含量降至 49.8%。这主要是由于机械扰动增加了污泥堆层中的氧气含量，从而加速了好氧微生物的代

谢活动,扰动频率越高,通氧量越多,好氧微生物的生命活动越旺盛,有机质降解越显著。

干化产物pH同样会影响土壤的酸碱度以及焚烧炉与辅助系统的服役寿命(造成腐蚀问题)。根据该处理厂的工艺路线可知,阳光棚中初始污泥为厌氧污泥,含有一定的有机酸,因此在干化初期,三组污泥均呈现出弱酸性,pH在4.8~5.5之间。随着干化时间的推移,污泥中的含氮有机物在微生物的氨化作用下转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,碱性增强,pH升高。到后期,伴随着氨气挥发、氨化作用减弱以及硝化作用增强,污泥堆层逐渐稳定,pH接近7.0(见图8)。如前所述,机械扰动有利于好氧微生物的生命活动,此时有机物降解、氨化、挥发等过程均得以加速,因此污泥pH升高更快,但干化终点产物仍呈中性。

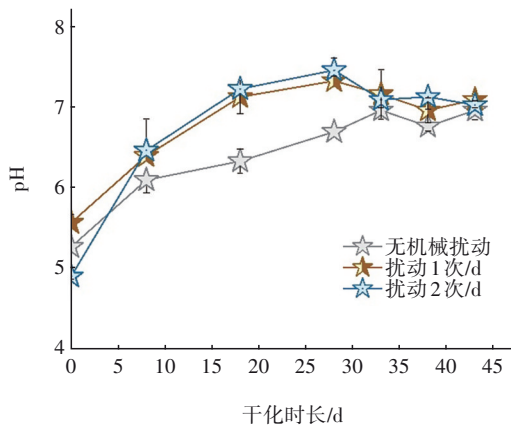


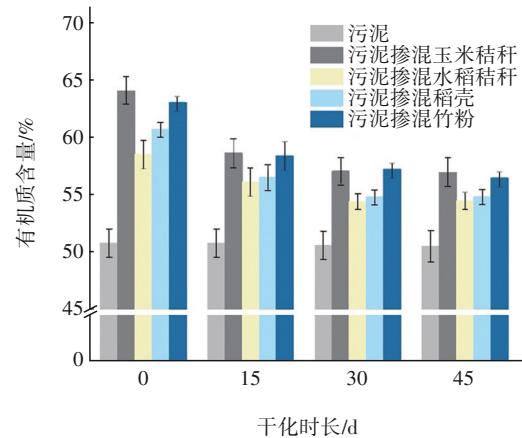
图8 机械扰动条件下污泥pH变化

Fig.8 Change in pH under mechanical disturbance conditions

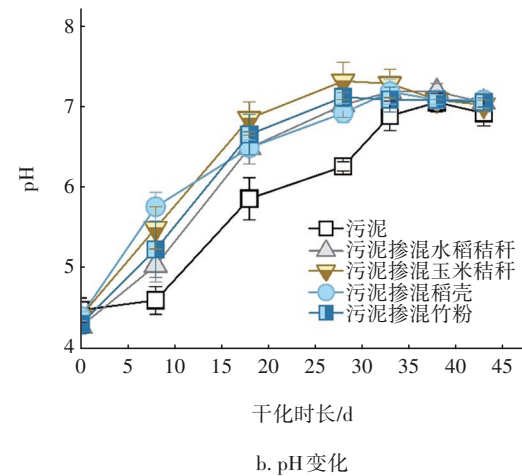
### 3.5 碳基骨架对污泥有机质含量及pH的影响

碳基骨架对污泥有机质含量及pH的影响如图9所示。可见,投加不同种类的骨架均使污泥有机质含量大幅增加,主要是因为碳基骨架含有丰富的木质纤维素,当它们与污泥混合时,这些木质纤维素成为污泥有机质的额外来源。其中,掺混玉米秸秆的污泥在干化初期有机质上升最高,总有机质含量达64.1%。随着干化过程的进行,污泥中的微生物利用碳基骨架中的有机质作为补充碳源和氮源进行新陈代谢,此时有机质含量下降幅度比未掺混骨架组更大。尤其是在干化初期(0~15 d),污泥中水分含量较高,好氧微生物活性较强,有机质含量下降速度最快。值得注意的是,尽管掺混骨架的污

泥在干化过程中有机质消耗增加,但终点产物的有机质含量仍高于未掺混的污泥。



a. 污泥有机质变化



b. pH变化

图9 碳基骨架掺混条件下污泥有机质含量和pH的变化  
Fig.9 Change in organic matter content in sludge and pH under conditions of carbonaceous skeleton blending

由图9(b)可知,各组污泥在初期均呈弱酸性,pH处于4.3~4.5之间。在干化过程中,掺混骨架组污泥pH开始上升,至第8天时掺混稻壳污泥的pH上升至5.7,增幅最大。此后,各组pH持续升高,掺混骨架组pH均高于同期原泥的。这说明,碳基骨架的存在使得氨化细菌活性增强,产生更多的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。干化进行38 d后,伴随着 $\text{NH}_3$ 逸出,各组污泥pH均回落至7.0左右。

## 4 结论

① 机械扰动能通过减小污泥粒径、缓解结壳效应来提高水分释放速率,从而显著缩短干化时间。扰动频次越高,干化初期水分释放速率越高,含水率下降越快。以出泥含水率40%为干化终点,扰动1次/d和扰动2次/d可使污泥干化时长分别缩

减49.3%与52.6%。

② 掺混玉米秸秆、水稻秸秆、竹粉、稻壳均能在机械扰动的基础上进一步促进污泥干化,其中玉米秸秆效果最佳,含水率降幅最高可达18.7%。因此,可以根据厂区周边原料以及季节性产量的变化,灵活交替使用不同的碳基骨架强化污泥水分释放。

③ 机械扰动可增强污泥干化过程中好氧微生物的生命活动,碳基骨架为有机质的微生物降解提供了额外的碳源和氮源,因此有机质含量略有下降。但是,机械扰动联合骨架掺混后,干污泥的有机质含量仍有所提高,产物呈中性。

#### 参考文献:

- [ 1 ] SALAMAT R, SCAAR H, WEIGLER F, *et al.* Drying of biogas digestate: a review with a focus on available drying techniques, drying kinetics, and gaseous emission behavior [J]. *Drying Technology*, 2022, 40 (1): 5-29.
- [ 2 ] SHAO L, WANG T, ZHAO L, *et al.* The effect of adding straw on natural solar sludge drying [J]. *Drying Technology*, 2015, 33(4): 414-419.
- [ 3 ] LING W, XING Y, ZHAO C, *et al.* Research progress on exhaust gas emissions and control technology during sewage sludge thermal drying: a review [J]. *Drying Technology*, 2024, 42(1): 1-18.
- [ 4 ] SANTOS A F, VAZ T E, LOPES D V, *et al.* Beneficial

use of lime mud from kraft pulp industry for drying and microbiological decontamination of sewage sludge [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 296: 113255.

- [ 5 ] MATHIOUDAKIS V L, KAPAGIANNIDIS A G, ATHANASOULIA E, *et al.* Sewage sludge solar drying: experiences from the first pilot-scale application in Greece [J]. *Drying Technology*, 2013, 31 (5) : 519-526.
- [ 6 ] XIAO H, LIU H, JIN M, *et al.* Process control for improving dewatering performance of sewage sludge based on carbonaceous skeleton-assisted thermal hydrolysis[J]. *Chemosphere*, 2022, 296: 134006.
- [ 7 ] LIU J, LIU H, HE C, *et al.* Correlation between sewage sludge pore structure evolution and water filtration performance: effect of thermal hydrolysis with or without carbonaceous skeleton-assisted [J]. *Water Research*, 2025, 268: 122578.
- [ 8 ] HU H, LIU H, XIAO H, *et al.* Assisting role of carbonaceous skeleton in sludge thermal hydrolysis and press filtration [J]. *Chemosphere*, 2024, 352: 141501.

作者简介:颜莹莹(1982- ),男,福建泉州人,硕士,高级工程师,主要从事污泥处理工程设计及研究工作。

E-mail:yanyingying2018@163.com

收稿日期:2025-01-25

修回日期:2025-02-19

(编辑:李德强)

坚持山水林田湖草沙一体化和系统治理,  
构建从山顶到海洋的保护治理大格局