

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.12.004

# 基于分离预处理的城镇污泥原位资源化技术分析

Analysis of in-situ municipal sludge resource utilization technology based on separation pretreatment

王学科<sup>1</sup>, 陈北洋<sup>2</sup>, 周保卫<sup>2</sup>, 穆童<sup>3</sup>, 张春苗<sup>3</sup>, 杨再威<sup>2</sup>, 汪诚文<sup>1\*</sup>  
WANG Xueke<sup>1</sup>, CHEN Beiyang<sup>2</sup>, ZHOU Baowei<sup>2</sup>, MU Tong<sup>3</sup>, ZHANG Chunmiao<sup>3</sup>,  
YANG Zaiwei<sup>2</sup>, WANG Chengwen<sup>1\*</sup>

(1.清华大学 环境学院, 北京 100084; 2.华电水务科技股份有限公司, 北京 100070;  
3.天津壹新环保工程有限公司, 天津 300403)

(1.School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.Huadian Water Technology Company Limited, Beijing 100070, China; 3.Tianjin Yixin Environmental Technology Company Limited, Tianjin 300403, China)

**摘 要:**结合污水处理厂生产运行情况,增加污泥分离预处理工序段,并耦合国内主流污泥处理技术,可补足现有工艺短板,实现污泥的高效精准资源化利用。通过破坏污泥中的胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)降低污泥黏性,实现对污泥有机物、无机盐类和砂组分的分离。分离后污泥有机物质量分数高于75%,热值稳定在12 MJ/kg以上,用作生物质燃料可自持燃烧;或无需添加辅料即可符合污泥堆肥的要求;或用作厌氧发酵沼气产量可提升至96.0 mL/g,且沼液浓度低,处理相对简单。分离出的铝铁盐可用作污水处理厂絮凝剂进行化学除磷,磷盐可回收作为园林绿化用磷肥原料,砂组分经脱水及自氧化干化后可用作建筑基材。

**关键词:**污泥;分离预处理;胞外聚合物;有机组分;无机金属盐;原位资源化

**中图分类号:**TK 09 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2021)12-0023-06

**Abstract:** Sludge separation was added into pretreatment process of sewage treatment plants considering their operation status. Coupled with domestic mainstream sludge treatment technology, sludge separation can make up the existing shortcomings and realize the efficient and accurate resource utilization of sludge. Destroying the extracellular polymeric substance (EPS) in sludge can reduce the viscosity of sludge and separate organic matter, inorganic salts and sand out of sludge. After separation, the content of organic matter in sludge is more than 75%, and the calorific value is more than 12 MJ/kg. The treated sludge can be used as biomass fuel for self-sustaining combustion or sludge composting without adding auxiliary materials. And it can increase the biogas production in anaerobic fermentation to 96.0 mL/g, and lower the concentration of biogas slurry and the treatment difficulty. The separated aluminum and ferric salt are used as flocculants for chemical phosphorus removal in wastewater treatment plants. The phosphorus salt can be recycled as raw material of phosphorus fertilizer for landscaping. The sand component can be used as building material after dehydration and self oxidation drying.

**Keywords:** sludge; separation in pretreatment; extracellular polymeric substance; organic component; inorganic metal salt; in-situ resource utilization

## 0 引言

污水是资源和能源的载体,污水中化学需氧量(COD)对应有机物含有大量化学能,COD为1 mg/L时1 m<sup>3</sup>污水含化学能约

16.2 kJ,是污水能源利用的主要途径<sup>[1-3]</sup>。

然而,我国污水处理长期以来“重水轻泥”,污泥处理设施能力不足;稳定化、资源化利用率低;绿色生态化处置方式更无从谈起。截至2019年年底,全国城市污水处理厂年产含水率为80%的污泥已超6 000万t,处置方式中污泥填埋占65%,焚烧占20%,土地及其他方式利用占15%<sup>[4]</sup>。

收稿日期:2021-05-07;修回日期:2021-10-11

基金项目:中国华电集团科技项目(CHDKJ21-01-52)

2020年7月出台的《城镇生活污水处理设施补短板强弱项实施方案》要求加快推进污泥无害化和资源化利用,在减量化基础上因地制宜地选择适宜的处置技术路线,使污泥处理处置成为城市废物生态循环产业链中的一环,形成可持续的污泥利用和消纳模式<sup>[5]</sup>。政策方面,调整运营服务补偿机制,将特许经营项目污泥处理处置费用并入污水处理服务费,旨在将污泥资源化利用的主动权向社会资本方转移,促进污水处理厂深入挖掘污泥的资源属性,力争实现变废为宝。

## 1 污泥成分及特点

### 1.1 污泥成分

污泥是污水处理中有机污染物的主要富集载体,有机污染物含量差异大、种类繁多,决定了污泥构成的复杂性<sup>[6]</sup>。

污泥中的有机成分主要包括细菌菌体、有机残片及胞外聚合物(extracellular polymeric substance, EPS)等,污水中质量分数30%~50%的COD、20%~30%的氮和约90%的磷转入污泥中,如能够合理利用,是非常宝贵的资源。

污泥中的无机成分主要包括无机金属盐、砂等。以处理生活污水为主的污水处理厂初次沉淀污泥与二次沉淀污泥无机质质量分数为20%~30%,含砂率10%~15%。处理工业废水占比较高的污水处理厂初次沉淀污泥与二次沉淀污泥中无机质质量分数为50%~70%,含砂率高达22%~44%<sup>[7]</sup>。

污泥中无机成分占比高,主要由于无机质占比与污水中工业废水比例呈正相关性。城市污水处理厂多混合工业废水,因此污泥中无机质占比一般在50%以上。同时,我国城市管网建设雨污分流不彻底,污水处理厂除砂设备效率低,导致污泥含砂率高。另外,污水处理中投加的化学除磷药剂主要为聚铁或聚铝等混凝剂,也引入了大量无机盐类。污水处理厂污泥成分及各项占比如图1所示。

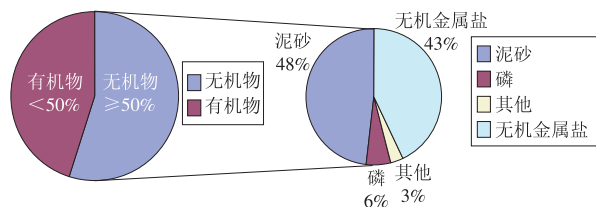


图1 污泥成分及各项占比

Fig. 1 Composition and proportion of components in sludge

### 1.2 污泥性状特点

污泥中50%~90%的有机物以EPS和微生物菌体形式存在。EPS由多聚糖类、脂质、蛋白质、核酸

以及某些小分子类物质相互结合聚集而成<sup>[8]</sup>。EPS作为有机聚合物,黏度大、难降解,制约了污泥脱水 and 资源化利用。因此EPS的降解是实现污泥高效资源化利用的关键因素<sup>[9]</sup>。

污泥常温脱水恶臭污染物来源于污水、污泥及其厌氧产物,主要分为含硫化合物、含氮化合物、含氧有机物以及烃类化合物<sup>[10-11]</sup>。众多污染物中, $H_2S$ 和 $NH_3$ 的排放浓度最高。污泥加热干燥恶臭污染物来源还包括不稳定化合物受热分解产物,如CO,  $SO_2$ ,  $NO_x$ 等,其成分和浓度受加热时间及温度影响大。恶臭污染物嗅阈值低,极易损害生活环境。

污水处理需要加入大量絮凝剂,导致污泥中铝铁盐含量较高。铝并不是植物生长的必需元素,当 $Al^{3+}$ 被动进入植物营养器官后会积累在细胞壁或细胞器中并影响植物的营养生长和生殖生长<sup>[12]</sup>。多数陆生植物对Al的毒害作用极其敏感,Al抑制植物根尖细胞生长和细胞分裂,使植物根变短、变粗,影响根对水分和养分的吸收。Al还会抑制植物对P, Ca, Mg, Fe, K, Mn和Cu等矿质元素的吸收、积累和代谢,所以直接用污水处理厂原泥做成的成品肥料不仅肥效低而且不利于植物生长。

污水处理厂进水中污泥有机物含量(VS/TS)约50%,砂含量高、粒度小,平均粒度低于50  $\mu m$ ,粒度为200  $\mu m$ 以下颗粒占90%以上<sup>[13]</sup>。

### 1.3 污泥资源化利用的限制因素

由于污泥性状的特殊性,在资源化利用方面存在诸多问题和弊端。首先,由于污泥有机物含量低、热值低,直接干化焚烧处理成本高;厌氧消化产沼率低;好氧堆肥辅料掺加量大;碳化需借助外加热源,能耗成本极高。其次,由于砂占比较高,磨损增加,影响设备使用寿命<sup>[14]</sup>。另外,无机盐类占比高,土地利用存在潜在风险。

## 2 污泥分离预处理技术

### 2.1 污泥全面资源化利用思路

根据污泥成分及特点,结合污水处理厂生产运行情况,提出在经济合理范围内增加污泥分离预处理工序段,将污泥的有机物、无机盐类、砂成分进行分离,并在污水处理厂内分别进行“原位”资源化利用的思路。分离出的有机物经脱水干化后制成生物质燃料,或经过好氧堆肥制成肥料;铝铁盐作为絮凝剂循环利用;磷盐制成磷肥;砂经脱水并自氧化干化后可作为建材或路基土使用,如图2所示。压滤水及冲洗水回至污水处理厂前端处理后达标排放。污泥的分离预处理工艺可以直接和污水处理工艺进行耦合,将二次沉淀池和生化段产生的污

泥直接进行预处理,完成污泥的原位减量化、稳定化,分离后的各成分结合后续资源化,实现污泥“源头减量+梯级利用+末端资源化”。

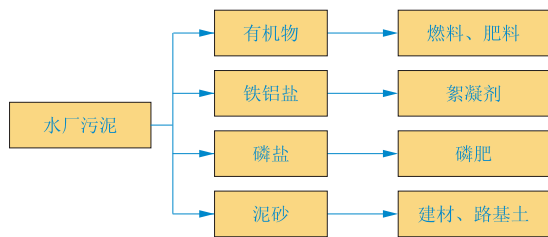


图2 污泥全面资源化利用思路  
Fig. 2 Comprehensive utilization process of sludge

2.2 分离预处理方法

2.2.1 污泥改性

在含水率约95%的污泥中投加复合型灭菌剂,灭菌后污泥进入菌胶团破碎装置并加入氧化剂(不含铁盐、铝盐及氯离子)进行改性,破坏污泥EPS,使污泥中铁、铝、磷的氧化物还原成溶解态溶入液相。

2.2.2 污泥淋洗

将改性后的污泥进行固液分离,对固相污泥进行反复淋洗,目的是将无机盐类最大程度溶解、浸提出来,并对分离出的上清液与淋洗液进行收集。

2.2.3 磷和铝铁盐的分离

在收集的上清液及淋洗液中加入还原性药剂,将其中溶解性磷盐还原成氧化物或氢氧化物并进行沉淀反应得到含磷的混合物,固液分离后液相为铝铁盐。图3为污泥中磷盐及铝铁盐的分离效果,其中图3a为沉淀反应后的含磷混合物,图3b为改性后的污泥,图3c为含铁、铝的上清液。

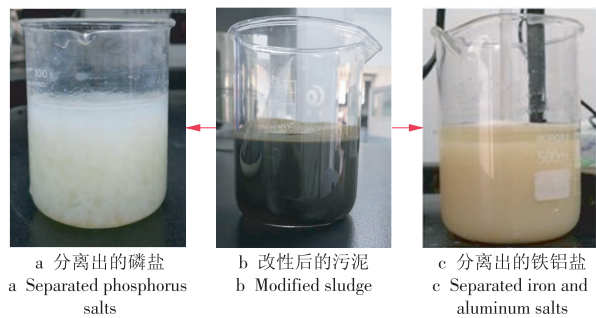


图3 污泥中磷盐及铝铁盐的分离效果  
Fig. 3 Separation effect of phosphorus, iron and aluminum salts in sludge

2.2.4 有机污泥和砂的分离

经过淋洗的固相污泥进入砂分离装置,利用有机污泥与砂的比重差(相差2~3倍)进行旋流分离,分离出轻质有机污泥和重质砂组分。图4为污泥中砂与有机组分的分离效果,其中图4a为固相污泥经旋流分离后的砂,图4b为旋流分离除砂装置,图4c

为旋流分离后的有机污泥。

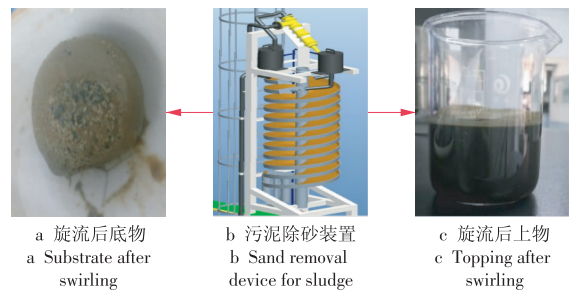


图4 污泥中砂与有机组分的分离效果  
Fig. 4 Separation effect of sand and organic components in sludge

2.2.5 脱水

将砂组分与2.2.3步骤分离出的无机磷盐混合脱水,脱出泥饼即为无机泥饼。分离出的轻质有机组分脱水后即有机泥饼。

2.2.6 废液和废气的处理

脱水滤液部分回至工艺前段用于污泥调质和冲洗,少量剩余废水进入污水处理系统。污泥在调质灭菌及分离环节全部采用密闭罐体或池体,内部空间采用负压抽气,气体处理后达标排放。

2.3 分离预处理的工艺流程

污泥经稀释调质、灭菌处理后,首先进入菌胶团破碎装置进行改性,使污泥中EPS彻底失去作用,污泥黏性降低;随后污泥进入有机无机分离装置,分离后的有机和无机组分分别进行高压脱水,后续可对干泥进行资源化利用;分离出的铝铁盐等则作为絮凝剂在污水处理厂进行回用,如图5所示。

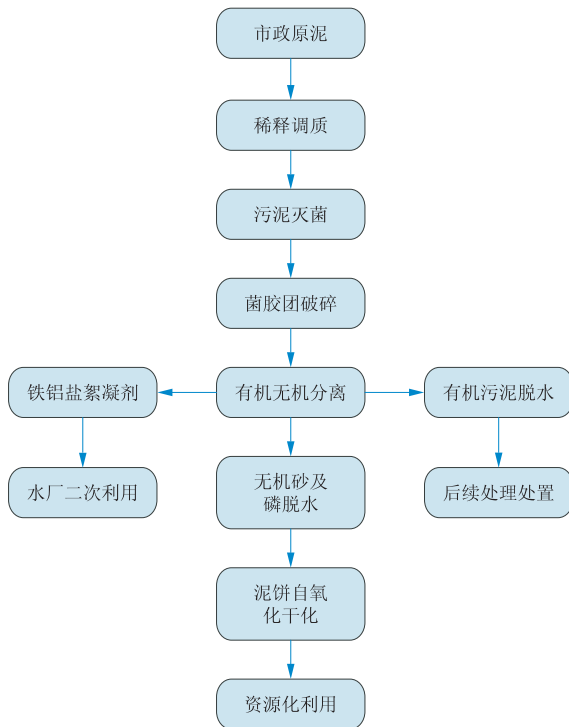


图5 污泥分离工艺流程  
Fig. 5 Sludge separation process

3 分离预处理技术的应用效果

3.1 对 EPS 的破坏效果

对经过灭菌和菌胶团破碎处理后的污泥 EPS 进行电镜扫描观察,污泥外包裹的絮体结构被彻底破坏,结构变得松散,污泥黏性降低,无法再裹挟大量水分,因此脱水性能有实质性提升。添加少量聚丙烯酰胺助滤剂即可脱水至含水率 65% 以下甚至更低,脱水效果明显增强,且几乎不增加污泥体量,使后续处理设施效率更高,投资更少。

3.2 有机与无机成分分离效果

EPS 的破坏可实现污泥有机和无机组分分离,最高可使原泥中 80% 的无机物被分离出来。按照原泥中有机物与无机物各占 50% 计算,最终的分离比例为有机污泥 60%,无机污泥 40%。折合 1 t 含水率 80% 的污泥经处理后可分离出含水率 60% 以下的无机污泥 200 kg,含水率 65% 的有机污泥 343 kg。经过检测,有机污泥中有机物含量高于 75%,无机污泥中有机物含量低于 5%,如图 6 所示。



图 6 污泥有机与无机成分分离效果  
Fig. 6 Separation effect of organic and inorganic components in sludge

3.3 有机与无机成分分离对污泥热值提升效果

污泥中的有机物含量决定了污泥的热值和可消化性,有机与无机成分分离工艺最直观的检测方式是检测原泥分离后的有机污泥热值提升情况。对比天津市武清区污水处理厂 6 批次污泥样品进行分离预处理后的热值数据,见表 1。

表 1 污泥分离前后热值对比  
Tab. 1 Comparison of calorific value before and after sludge separation

| 采样批次 | 原泥平均热值 | 分离后污泥热值 |
|------|--------|---------|
| 1    | 5.263  | 12.449  |
| 2    | 5.678  | 13.196  |
| 3    | 5.573  | 12.957  |
| 4    | 6.258  | 12.310  |
| 5    | 7.211  | 14.062  |
| 6    | 7.820  | 13.058  |

注:表中数值为多次检测后平均值。

通过多次取样检测,结果显示有机污泥的热值稳定在 12 MJ/kg 以上,已接近生物质燃料的热值,并

且分离后的有机污泥的性质相比原泥更加稳定,使后续工艺的稳定性更有保证。分离后有机污泥的工业分析见表 2。

表 2 有机污泥的工业分析  
Tab. 2 Proximate analysis of organic sludge

| 项目   | 收到基   | 空气干燥基 | 干燥基   | 干燥无灰基 |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 全水分  | 5.70  |       |       |       |
| 煤样水分 |       | 6.44  |       |       |
| 灰分   | 26.97 | 26.76 | 28.61 |       |
| 挥发分  | 54.67 | 54.24 | 57.97 | 81.20 |
| 固定碳  | 12.66 | 12.56 | 13.42 | 18.80 |

4 分离组分资源化应用

污泥有机与无机成分分离工艺可作为现有常规工艺的预处理工艺,后续可对接所有主流工艺,并补足其短板。

4.1 有机组分资源化

4.1.1 干化焚烧

以 10.00 t 含水率 80% 污泥为例,直接干化至含水率 30%,需蒸发水 7.15 t;脱水至含水率 65% 再干化至含水率 30%,蒸发水 2.86 t;而先分离无机组分及压滤水再深度脱水至含水率 65%,最后干化至含水率 30%,仅需蒸发水量 1.72 t。可见分离预处理可显著降低蒸发水量,降低能耗,如图 7 所示<sup>[15]</sup>。

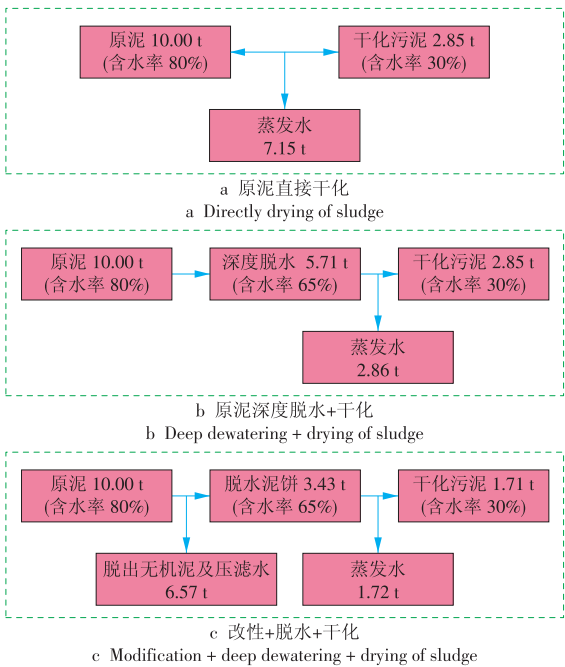


图 7 蒸发水量对比

Fig. 7 Comparison of water evaporation

分离预处理使焚烧阶段不再因存在无机物而浪费热能,实现了污泥处理系统的热能自平衡,污泥的干化焚烧不再需要任何附加燃料。分离出的

有机污泥既可单独焚烧,也可在火电厂进行燃煤掺烧,如图 8 所示。工程应用中,污泥焚烧产生废气经过烟气处理可满足 GB 18485—2014《生活垃圾焚烧污染控制标准》中排放标准。焚烧后的炉渣满足 GB 25031—2010《城镇污水处理厂污泥处置 制砖用泥质》标准。

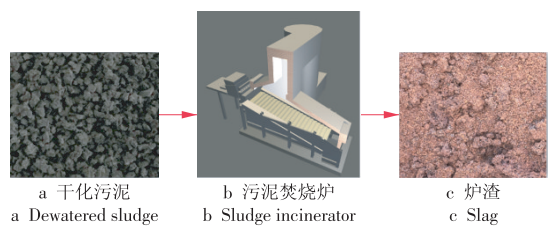


图 8 有机污泥的焚烧过程  
Fig. 8 Incineration process of organic sludge

4. 1. 2 好氧堆肥

分离出的有机污泥无需添加辅料即符合污泥堆肥的要求,可降低好氧堆肥系统的投资及运行成本,并使堆肥升温速率更快。通过对分离后有机污泥堆肥现场的数据监测可以看出,堆体温度在 5 d 内即可上升至 71 ℃ 以上,且在 7 d 后含水率降低到 52% 以下,有持续水蒸气外溢,物料非常松散,如图 9 及图 10 所示。

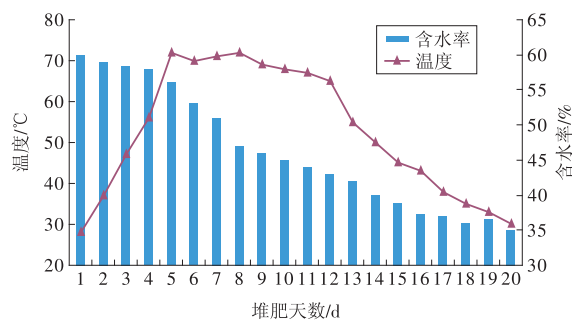


图 9 污泥堆肥温度及含水率变化

Fig. 9 Sludge composting temperature and moisture content changes

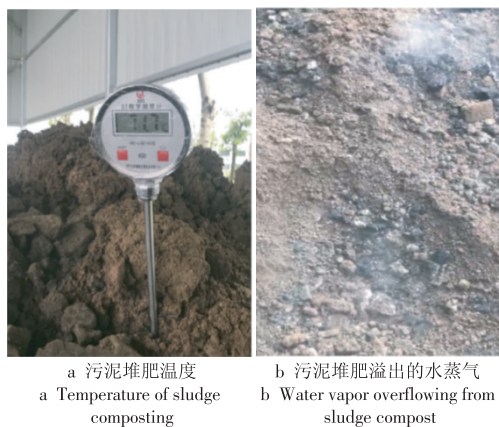


图 10 污泥堆肥温度及状态

Fig. 10 Temperature and state of sludge composting

4. 1. 3 厌氧发酵

污泥经分离预处理后,有机污泥体积可减小至原污泥体积的 67%,相当于单位时间内的污泥处理量可提高至原来的 1.5 倍。

分离预处理后污泥有机物含量明显提高,厌氧发酵产气量从 67.5 mL/g 提高到 96.0 mL/g 以上。在污泥量充足的前提下,沼气产量可实现翻倍。由于分离预处理过程仅对污泥 EPS 进行破坏,并不对生物细胞进行破壁,因此脱出沼液 COD 及氨氮浓度很低,处理相对简单。

4. 2 无机组分资源化

分离预处理得到的铝铁盐回至污水处理厂进行二次利用,其除磷效果与市面上常规的聚合氯化铝(PAC)相比较,可替代后者 50%~70% 投加量,可降低污泥处理成本。磷盐可作为用磷肥原料,外售给绿化或苗木种植企业<sup>[16]</sup>。砂组分进行高压脱水后外售给建材厂家,作为建筑基材使用。

5 分离预处理技术的经济效益

分离预处理技术相比传统污泥处理工艺,投资和运行成本较低。按照污泥处理规模 150 t/d (含水率为 80%) 计算,运行成本包括药剂费 25.0 元/t、电费 49.0 元/t、人工费 19.0 元/t、检测费 1.0 元/t、飞灰处理费 0.5 元/t 等,共计 94.5 元/t;设备投资费用 77.0 元/t,总投资运行费用为 171.5 元/t,远低于市场污泥处理费用 300.0 元/t,利润空间较为可观,符合市场发展的需求,并且有良好的社会 and 经济效益。

6 结论

(1)分离预处理工艺破坏了污泥的 EPS,降低污泥黏性,提高污泥溶液中无机盐的溶解性,可以实现污泥有机物、无机盐类和砂组分的分离。

(2)分离得到的有机污泥中有机物含量高于 75%,热值稳定在 12 MJ/kg 以上,可作为生物质燃料实现自持燃烧;或无需添加辅料即可符合污泥堆肥的要求;用于厌氧发酵沼气产率翻倍。

(3)分离得到的铝铁盐回收至污水处理厂二次利用,其除磷效果与市面上常规 PAC 相比较,可替代其 50%~70% 投加量。磷盐可作为园林绿化用磷肥原料。砂组分可作为建筑基材。

(4)分离预处理工艺最大程度地体现了绿色环保的先进理念,与国内主流污泥技术耦合可补足现有工艺短板,实现污泥的高效精准资源化利用。

## 参考文献:

- [1] 郝晓地. 污水处理碳中和运行技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [2] 郝晓地, 方晓敏, 李季, 等. 污水碳中和运行潜能分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(10): 11-16.  
HAO Xiaodi, FANG Xiaomin, LI Ji, et al. Analysis of potential in carbon-neutral operation of WWTPs [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(10): 11-16.
- [3] 梁远, 付岩峰, 方小锋, 等. 碳中和背景下基于 AB 工艺的污水处理厂能量自持分析[J]. 华电技术, 2021, 43(6): 55-60.  
LIANG Yuan, FU Yanfeng, FANG Xiaofeng, et al. Energy neutral analysis of sewage treatment plant based on AB method under the background of carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 55-60.
- [4] 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.  
DAI Xiaohu. Applications and perspectives of sludge treatment and disposal in China [J]. Science, 2020, 72(6): 30-34, 4.
- [5] 杭世珩. 《全国城镇生活污水处理设施补短板强弱项实施方案》解读[J]. 给水排水, 2020, 46(9): 1-3.  
HANG Shijun. Interpretation of Implementation plan for strengthening the weak points of national urban domestic sewage treatment facilities [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(9): 1-3.
- [6] LIU C, XU Y P, MA M, et al. Evaluation of endocrine disruption and dioxin-like effects of organic extracts from sewage sludge in autumn in Beijing, China [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2013, 8(3): 433-440.
- [7] 王建伟, 廖足良, 毕学军, 等. 典型城市污水处理厂污泥无机质含量及含砂率分析[J]. 环境工程, 2013, 31(S1): 321-324.  
WANG Jianwei, LIAO Zuliang, BI Xuejun, et al. The analysis of the inorganic content and sand content in sludge from typical municipal wastewater treatment plant [J]. Environmental Engineering, 2013, 31(S1): 321-324.
- [8] 蒋心茹, 姬高升, 刘杨, 等. 市政污泥胞外聚合物(EPS)的形成过程与解聚方法研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(5): 1282-1289.  
JIANG Xinru, JI Gaosheng, LIU Yang, et al. Overview of extracellular polymeric substance (EPS) generation and disaggregation in municipal sewage sludge [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(5): 1282-1289.
- [9] 黎文威, 张晓云. 城市污泥脱水技术及脱水污泥资源化利用的研究进展[J]. 环境, 2011(S1): 52-54, 73.
- [10] PIRINGER M, SCHAUBERGER G. Environmental odour: Emission, dispersion, and the assessment of annoyance [J]. Atmosphere, 2020, 11(9): 896.
- [11] GOSTELOW P, PARSONS S A, STUETZ R M. Odour measurements for sewage treatment works [J]. Water Research, 2001, 35(3): 579-597.
- [12] 张冉, 韩博, 任健, 等. 铝对植物毒害及草本植物耐铝毒机制研究进展[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2020, 35(2): 353-360.  
ZHANG Ran, HAN Bo, REN Jian, et al. Research progress on aluminum toxicity to plants and mechanisms of aluminum tolerance in herbaceous [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2020, 35(2): 353-360.
- [13] 戴晓虎, 赵玉欣, 沙超, 等. 我国污水处理厂污泥含砂特征及成因调研[J]. 给水排水, 2014, 40(S1): 75-79.  
DAI Xiaohu, ZHAO Yuxin, SHA Chao, et al. Investigation on the status and causes of sludge sand content of wastewater treatment plants in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(S1): 75-79.
- [14] 陈全喜, 付江涛. 市政污泥耦合燃煤电厂发电关键因素分析与展望[J]. 华电技术, 2021, 43(10): 50-60.  
CHEN Quanxi, FU Jiangtao. Analysis and prospect of key factors affecting the coupling of municipal sludge combustion and coal-fired power plants [J]. Huadian Technology, 2021, 43(10): 50-60.
- [15] 邓易芳, 吴俊奇, 刘昌强, 等. 城市污泥资源化与源头减量化方法[J]. 应用化工, 2019, 48(5): 1202-1207.  
DENG Yifang, WU Junqi, LIU Changqiang, et al. Urban sludge resource utilization and source reduction methods [J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(5): 1202-1207.
- [16] 宋艳会, 李兵, 杨培君. 污水处理厂污泥减量化技术的探讨[J]. 当代化工, 2020, 49(11): 2570-2573, 2578.  
SONG Yanhui, LI Bing, YANG Peijun. Discussion on sludge reduction technology for sewage treatment plant [J]. Contemporary Chemical Industry, 2020, 49(11): 2570-2573, 2578.
- [17] 胡维杰, 赵由才, 甄广印. 德国污水污泥处理处置政策及磷回收技术解析与启示[J]. 给水排水, 2020, 46(6): 15-20.  
HU Weijie, ZHAO Youcai, ZHEN Guangyin. Analysis and inspiration of sewage sludge treatment & disposal policy and phosphorus recovery technology in Germany [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(6): 15-20.

(本文责编: 惠忻)

## 作者简介:

王学科(1975—), 男, 天津人, 高级工程师, 从事市政污水处理技术研究和管理工作。

陈北洋(1985—), 女, 天津人, 高级工程师, 从事市政污水处理技术研究和管理工作。

周保卫(1968—), 男, 安徽泗县人, 正高级工程师, 从事发电厂和市政水处理研究和管理工作。

穆童(1987—), 男, 天津人, 助理工程师, 从事污泥资源化研究和管理工作。

张春苗(1989—), 女, 河北唐山人, 从事污泥资源化研究和管理工作。

杨再威(1998—), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 助理工程师, 从事市政污水处理技术研究和管理工作。

汪诚文\*(1968—), 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 博士, 从事城市水系统处理及相关资源化、工业污染防治及相关物质资源化技术的研究(E-mail: wangcw@tsinghua.edu.cn)。