

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.17.004

PSFS 工艺改造对浓缩污泥特性及脱水性能的影响

张显忠^{1,2}, 戴晓虎¹

(1. 同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 上海市城市建设设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200125)

摘要: 上海市某污水处理厂采用植物-泥-膜共生(PSFS)工艺进行改造,通过分析浓缩污泥性质及脱水性能指标,考察PSFS工艺对浓缩污泥特性的影响。结果表明,经PSFS工艺改造后,浓缩污泥的比阻和毛细吸水时间都有一定程度的降低,表明污泥脱水性能得到了改善。采用紫外可见连续光谱和三维荧光光谱对污泥浓缩上清液的溶解性有机物进行表征,发现经PSFS工艺改造后,污泥的微生物种群结构更丰富,而且腐殖化程度提高、可生物降解性降低。选取不同种类的调理剂对浓缩污泥进行调理,发现改造前污泥适合采用大分子、支链结构和阳离子度适中的阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)进行调理,改造后污泥适合采用中分子、线性结构和阳离子度高的CPAM进行调理。

关键词: 浓缩污泥; 植物-泥-膜共生(PSFS)工艺; 溶解性有机物; 脱水调理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)17-0018-05

Effect of PSFS Process Transformation on Characteristics of Thickened Sludge and Its Dewatering Performance

ZHANG Xian-zhong^{1,2}, DAI Xiao-hu¹

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200125, China)

Abstract: A wastewater treatment plant in Shanghai has been transformed by plant-sludge-film symbiosis (PSFS) process. Through the analysis of thickened sludge properties and dewatering indexes, the effect of PSFS process on characteristics of thickened sludge was investigated. Main indicators of thickened sludge dewatering performance including specific resistance and capillary water absorption time were reduced after PSFS process transformation, indicating that dewaterability of the sludge was improved. Dissolved organic matters in sludge concentrate supernatant were characterized by ultraviolet-visible spectroscopy and three-dimensional fluorescence spectroscopy. After PSFS process transformation, the sludge had a more abundant microbial community structure, higher humification degree and lower biodegradability. Different kinds of conditioners were selected to condition the dewatering performance of the thickened sludge. It was found that the sludge before transformation was suitable to be conditioned by CPAM with macromolecule, branched chain structure and moderate cationic degree. However, the sludge

after transformation was suitable to be conditioned by CPAM with moderate molecular, linear structure and high cationic degree.

Key words: thickened sludge; plant-sludge-film symbiosis (PSFS) process; dissolved organic matter; dewatering conditioning

1 工程背景

上海市某污水处理厂始建于 1988 年,1990 年建成投入运行,设计规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该污水处理厂初期采用的工艺为缺氧/好氧二级生物处理工艺,无强化除磷功能,随后采用多点进水改良 AAO 工艺进行升级改造;2016 年,采用植物-泥-膜共生(PSFS)工艺进行提标改造,并于 2019 年 3 月底完成,目前出水水质可以稳定达到国家一级 A 标准。PSFS 工艺是一个高度集约的生态系统,以特殊立体弹性填料和植物根系为生物载体,通过构建高度多样化的复合生态系统,增强对水体中污染物的降解能力。该污水处理厂的工艺流程见图 1,有别于传统提标改造所采用的 AAO+深度处理工艺,其采用 PSFS 工艺进行改造,通过对比分析改造前后的浓缩污泥特性及脱水性能,可为后续采用此类工艺的污水厂在污泥脱水处理方面提供有益参考。

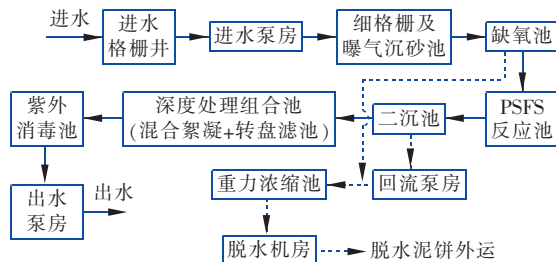


图 1 污水处理厂工艺流程

Fig. 1 Process flow chart of wastewater treatment plant

2 试验材料与方法

试验污泥及上清液均取自该污水处理厂重力浓

表 1 污水处理厂改造前后的泥质特性

Tab. 1 Sludge characteristics in wastewater treatment plant before and after transformation

项 目	MLSS/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH 值	含水 率/%	黏度/ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	SV ₃₀ / %	比阻/ ($10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$)	CST/s	TOC/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
改造前	34.8	6.7	96.5	117.3	100	24.5	5.2	157.9
改造后	13.0	6.6	98.7	57.6	42.1	4.0	2.6	142.6

由表 1 可知,经过 PSFS 工艺改造后,MLSS 浓度有所降低,污泥黏度和 SV₃₀ 值下降明显。这可能是因为污水厂为了使出水 TP 达标而投加了铁盐,铁盐的混凝效果使得污泥沉降性相对较好,再加上

缩阶段。混合液悬浮固体浓度 (MLSS)、含水率、pH 值、黏度、污泥沉降比 (SV₃₀) 的测定均采用国家标准方法;污泥比阻 (SRF)、毛细吸水时间 (CST)、污泥过滤时间 (TTF) 均采用成体系的脱水指标测定方法进行测定^[1];污泥粒径采用 SALD-2201 激光衍射式粒度分布测量仪 (Shimadzu, 日本) 测定;总有机碳 (TOC) 采用 Multi N/C 3100 总有机碳/总氮分析仪 (Analytikjena, 德国) 测定;固体产物在 50 ℃ 烘干后采用 JSM-7800F 型扫描电镜 (Hitachi Ltd, 日本) 检测;溶解性有机物 (DOM) 含量以及种类变化采用紫外-可见光谱和三维荧光光谱 (3D-EEM) 进行测定和分析,其中紫外-可见光谱采用 UV-2550 (Shimadzu) 仪器检测,三维荧光光谱采用三维荧光光谱仪 (FluoroMax-4, Horiba, 日本) 检测。

3 污泥特性分析

选取 PSFS 工艺改造前后不同年份同一月份即 2014 年 5 月和 2019 年 5 月的浓缩污泥进行比较。2014 年 5 月的进水量为 $39\,616 \text{ m}^3/\text{d}$,脱水污泥外运量为 21.3 t/d ,脱水污泥含水率为 78.8%;2019 年 5 月的进水量为 $34\,266 \text{ m}^3/\text{d}$,脱水污泥外运量为 23.2 t/d ,脱水污泥含水率为 78.7%。可以看出,随着出水水质的提高,污泥产量有较为明显的增加,产泥率由 $1.1 \text{ tDS}/10^4 \text{ m}^3$ 增长至 $1.4 \text{ tDS}/10^4 \text{ m}^3$ 。鉴于 PSFS 工艺与改造前的传统 AAO 工艺相差甚大,其所产污泥的性质也可能存在较大不同,因此选取改造前后的重力浓缩污泥进行泥质分析,以便比较污泥的基本性质、沉降性和脱水性,结果见表 1。

污泥浓度降低的影响,促使溶液的流变性质发生改变,使黏度指数也有较为显著的降低^[2]。另外,改造后污泥比阻和 CST 分别降低到 $4.0 \times 10^{12} \text{ m/kg}$ 和 2.6 s,表明污泥的脱水性得到了一定改善。

4 污泥浓缩上清液 DOM 表征

DOM 是污水处理的主要对象,其主要组分是溶解性微生物产物,包括糖类、蛋白质以及在生物处理过程中相对稳定的组分,如富里酸和腐殖酸。DOM 将影响水体 pH 值和水中污染物的毒性、生物降解性及迁移转化规律等环境行为特性,在污水处理中还会影响污泥的动力学活性和絮凝特性。本研究采用紫外-可见光谱及三维荧光光谱对改造前后上清液中的 DOM 进行表征,分析 PSFS 工艺对上清液中 DOM 含量及种类产生的影响。

4.1 紫外-可见光谱分析

紫外-可见光谱分析检测对紫外或可见光有吸收的组分,因此其表征的是有色溶解性有机物(CDOM)。研究表明,CDOM 作为 DOM 的重要组成部分,在不同波长(254、350 和 440 nm)的吸收系数与溶解性有机碳(DOC)浓度存在显著线性关系,从而为样品中 DOC 浓度的快速测定提供了理论依据。

对改造前后的污泥浓缩上清液进行紫外-可见光谱分析,并选取 5 个数值用于反映 PSFS 工艺对污泥的影响。其中, A_{254}/A_{365} 能够反映 DOM 分子大小的比例,其比值越大,水样中小分子比例越高; A_{300}/A_{400} 能够反映 DOM 的腐殖化程度,其比值越大,DOM 的腐殖化程度越低; A_{445}/A_{665} 能够表征苯环中碳骨架的聚合程度,其比值越小,聚合度越大,此值还与有机物分子质量大小相关,分子质量降低时,该值往往会升高; UV_{254} 主要代表包括芳香族化合物在内的具有不饱和碳碳双键的难降解物质,其值越大,则 DOM 中难降解的不饱和双键或芳香类有机物含量就越高;275~295 nm 与 350~400 nm 波段斜率之比(S_R)可用于表征 DOM 的结构变化, S_R 值越高,DOM 分子质量就越低,表明 DOM 被微生物降解的反应活性就越高^[3]。

改造前,污泥上清液的 A_{254}/A_{365} 、 A_{445}/A_{665} 、 A_{300}/A_{400} 、 S_R 分别为 4.43、10.00、3.65、1.41, UV_{254} 为 0.24 cm^{-1} ;改造后,以上指标分别为 3.42、2.89、2.87、1.30, UV_{254} 为 1.05 cm^{-1} 。可以看出,改造前 A_{254}/A_{365} 值较高,表明 DOM 中小分子比例较高,改造后 A_{254}/A_{365} 值降低明显,表明大分子比例提升明显,这与 A_{445}/A_{665} 值所表达的信息相同,即经 PSFS 工艺改造后,上清液中的有机物分子质量增大,且苯环中碳骨架的聚合程度提高。此结果表明,改造前污泥颗粒间聚合度较低、分子质量小,经 PSFS 工艺

改造后,由于系统投加铁盐的混凝作用使其污泥颗粒间聚合度变大、分子质量也相应增大。

经过 PSFS 工艺改造后, A_{300}/A_{400} 值明显变小,表明 DOM 的腐殖化程度有所提高,这与 UV_{254} 所表达的信息相符,即改造后具有不饱和碳碳双键的难降解有机物含量升高。以上数据表明,相比改造前,改造后污泥上清液中的 DOM 可能含有更多的类腐殖酸、缩氨酸、缩聚烃或脂质类物质,这可能是由于污水处理厂进水中存在较多难降解的不饱和双键或芳香类有机物,成为污泥上清液中溶解性有机物的重要组成部分。

S_R 表征了 DOM 的结构变化,经 PSFS 工艺改造后, S_R 值变小,说明改造可能影响了污泥的重力浓缩效果,使其污泥上清液中 DOM 的可生物降解特性要低于改造前。

4.2 三维荧光光谱分析

三维荧光光谱分析可用于研究 DOM 物质组成、官能团结构及分子动力学特征,不同的有机物组分都有其最大激发波长和发射波长,因此可以根据对应的光谱峰位置实现对荧光组分的定性分析。对 3D-EEM 光谱的定性分析可以通过荧光区域整合法(FRI)进行^[4-5]。有研究者将荧光光谱划分为 7 类荧光区,如图 2 所示。I 区:酪氨酸,II 区:色氨酸,III 区:类富里酸,IV 区:类糖化蛋白质,V 区:类黑素,VI 区:类胡敏酸,VII 区:类脂褐质。其中,I~III 区可总称为类蛋白质区,IV~VII 区总称为复杂有机物区。本次分析也将光谱图分为类蛋白质区及复杂有机物区进行讨论。

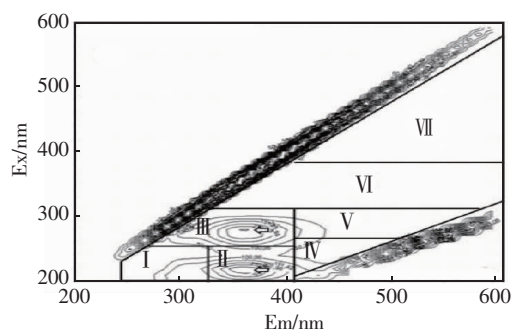


图2 三维荧光光谱的7类分区

Fig. 2 Seven classes of division of three-dimensional fluorescence spectrum

对改造前的污泥浓缩上清液进行 3D-EEM 光谱分析,如图 3(a)所示,检测到两个荧光峰,其中峰 A 的位置(Ex/Em ,下同)为 230~240 nm/290~315

nm,峰 B 的位置为 265 ~ 290 nm/300 ~ 360 nm,由于两个荧光峰均处在类蛋白质区且均为平顶峰,表明上清液中芳香族蛋白质及溶解性微生物代谢产物含量较高。对改造后的污泥浓缩上清液进行 3D - EEM 光谱分析,如图 3 (b) 所示,检测到 3 个荧光峰,其中峰 A'的位置为 225 ~ 230 nm/365 ~ 370 nm,峰 C 的位置为 230 ~ 235 nm/440 ~ 445 nm,峰 D 的位置为 345 ~ 350 nm/440 ~ 445 nm。峰 A'处在类蛋白区,其在 Em 轴上红移增加 50 nm,且荧光强度明显减弱,表明类蛋白类物质含量降低的同时,荧光基团中的羟基、羧基及胺基有所增加。峰 C 及峰 D 处在复杂有机物区,表明类腐殖酸及类富里酸等复杂有机物的含量有所增加。

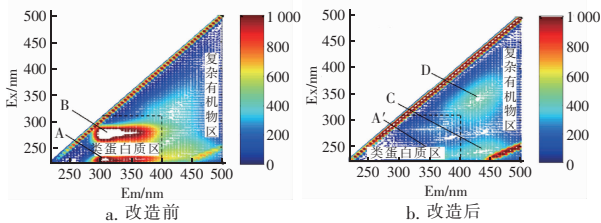


图 3 改造前后污泥上清液的三维荧光光谱
Fig. 3 Three-dimensional fluorescence spectra of sludge supernatant before and after transformation

4.3 DOM 表征分析

通过紫外 - 可见光谱和三维荧光光谱分析 PSFS 改造前后的污泥上清液,可以得出以下结论:①改造后,DOM 中的小分子有机物比例明显降低,具体体现为芳香族蛋白质及溶解性微生物代谢产物含量降低明显,除此之外还可能受系统投加铁盐的混凝作用的影响,使污泥颗粒间聚合度变大,从而导致分子质量增大;②改造后,DOM 的腐殖化程度有

所提高,表明 DOM 中具有不饱和碳碳双键的物质含量升高,具体表现为类腐殖酸、类富里酸物质含量增加;③改造后,DOM 的可生物降解性降低。

分析上清液 DOM 成分发生变化的原因,很可能是由于 PSFS 工艺采用植物 - 泥 - 膜共生系统,其作用主要体现在以下 3 个方面:①与 AAO 工艺相比,PSFS 工艺的泥龄相对较长;②植物根系的固氮作用使污泥微生物种群中硝化螺旋菌门含量大大增加,并增加了这类微生物在种群中的丰度,强化了系统处理污染物的效能;③污泥悬浮液具有更高的功能性微生物丰度,挂膜微生物中存在大量的节碳型脱氮细菌以及可以形成稳定菌胶团的细菌,可以使复杂有机物如芳香族蛋白质等得到降解,并转化为类富里酸等稳定有机物^[6-7]。

5 PSFS 工艺对污泥脱水性能的影响

聚丙烯酰胺(PAM)为水溶性高分子聚合物,不溶于大多数有机溶剂,具有良好的絮凝作用,其中阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)是目前浓缩污泥脱水调理过程中应用最为广泛的絮凝剂之一。该污水处理厂的剩余污泥经过重力浓缩后投加 CPAM 进行调理,然后采用离心机进行离心脱水。污泥脱水效果除了与污泥本身性质有关,还与絮凝剂特性有关。聚合物分子质量和电荷密度是影响污泥脱水效果的两个重要因素,高电荷密度能有效中和颗粒表面电荷,压缩双电层;高分子质量可以吸附更多颗粒,形成更大絮体,易于沉降。同时有研究表明,阳离子适中的产品同时拥有电中和与架桥作用,用量少、产生的絮体尺寸较大、脱水性能更好^[8]。

对改造前后浓缩污泥进行调理,研究其脱水性能,如表 2 所示。

表 2 污泥脱水调理方案
Tab. 2 Sludge dewatering conditioning scheme

项 目	调理剂参数			SRF/(10 ¹² m · kg ⁻¹)		CST/s		粒径/μm	
	结构	分子质量/ 10 ³ ku	阳离子度/%	原泥	调理后	原泥	调理后	原泥	调理后
改造前	支链	10 ~ 12 (大)	39 (适中)	18.5	0.2	59.2	9.5	59.6	455.6
改造后	线性	8 ~ 10 (中)	80 (高)	4.1	0.4	35.2	9.8	50.6	158.7

通过一系列前期对比研究发现,PSFS 改造前的浓缩污泥适合采用大分子、支链结构和阳离子度适中的 CPAM (调理剂 A) 进行调理^[1],当 PAM 调理剂加入量为 5.0 kg/tDS 时,污泥粒径明显增大,SRF 和 CST 明显降低,表明调理剂 A 的调理效果较好。

经过 PSFS 改造后,原污泥自身特性发生变化,脱水性能得到一定改善,通过一系列尝试,目前该污水处理厂采用中分子、线性结构和阳离子度高的 CPAM (调理剂 B) 对浓缩污泥进行调理,当投加量为 1.0 kg/tDS 时,调理后的污泥颗粒明显增大,SRF 和 CST

明显降低,表明调理剂 B 更利于污泥脱水。

6 结论

① 经 PSFS 工艺改造后,污泥浓度降低至13.0 g/L,加之系统中铁盐的存在,使污泥黏度和 SV_{30} 都明显下降,SRF 与 CST 也分别降到 4.0×10^{12} m/kg 和 2.6 s,表明当污泥浓度较低且系统中存在铁盐的情况下,污泥脱水性能会得到一定改善。

② PSFS 工艺相比于传统活性污泥法,系统高度集约的污泥微生物具有 3~4 倍之于活性污泥法的等效生物浓度,具有更为丰富的微生物种群结构,除此之外,改造后泥龄增加,这使得污泥浓缩上清液的 DOM 成分发生较大变化,主要体现在芳香族蛋白质及溶解性微生物代谢产物降解明显,腐殖化程度提高、可生物降解性降低。

③ PSFS 工艺改造前后污泥本身及所适用的脱水调理剂都发生了变化,改造前的污泥适合采用大分子、支链结构和阳离子度适中的 CPAM 进行调理,改造后的污泥适合采用中分子、线性结构和阳离子度高的 CPAM 进行调理。

参考文献:

- [1] 唐建国,吴炜,周振,等. 污泥脱水性能测定对污泥调理与脱水的重要性分析[J]. 给水排水,2017,43(12):11-16.
Tang Jianguo, Wu Wei, Zhou Zhen, *et al.* Analysis on the significance of sludge dewatering property determination of sludge conditioning and dewatering [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43 (12): 11 - 16 (in Chinese).
- [2] Peeters B, Dewil R, Vernimmen L, *et al.* Addition of polyaluminiumchloride (PACl) to waste activated sludge to mitigate the negative effects of its sticky phase in dewatering-drying operations [J]. Water Res, 2013, 47 (11): 3600 - 3609.
- [3] 李璐璐,江韬,闫金龙,等. 三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质(DOM)的紫外-可见光谱特征[J]. 环境科学,2014,35(3):933-941.
Li Lulu, Jiang Tao, Yan Jinlong, *et al.* Ultraviolet-visible (UV-Vis) spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in soils and sediments of typical water-level fluctuation zones of Three Gorges Reservoir areas [J]. Environmental Science, 2014, 35 (3): 933 - 941 (in Chinese).
- [4] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. Environ Sci Technol, 2003, 37 (24): 5701 - 5710.
- [5] He X S, Xi B D, Li X, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix spectra coupled with parallel factor and regional integration analysis to characterize organic matter humification [J]. Chemosphere, 2013, 93 (9): 2208 - 2215.
- [6] Rezakazemi M, Shirazian S, Ashrafizadeh S N. Simulation of ammonia removal from industrial wastewater streams by means of a hollow-fiber membrane contactor [J]. Desalination, 2012, 285: 383 - 392.
- [7] 刘雯,丘锦荣,卫泽斌,等. 植物-生物膜氧化沟处理生活污水的中试研究[J]. 中国给水排水,2009,25(15):8-10.
Liu Wen, Qiu Jinrong, Wei Zebin, *et al.* Pilot-scale research of plant-biofilm oxidation ditch for purifying municipal wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25 (15): 8 - 10 (in Chinese).
- [8] 郑育毅,江娟,孙启元,等. 不同分子量及离子度的 CPAM 对污泥脱水性能的影响研究[J]. 环境科学学报,2016,36(8):2947-2954.
Zheng Yuyi, Jiang Juan, Sun Qiyuan, *et al.* Effect of different molecular weight and ionic strength of CPAM on sludge dewaterability [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36 (8): 2947 - 2954 (in Chinese).



作者简介:张显忠(1983-),男,安徽六安人,博士,高级工程师,主要从事污水处理、海绵城市、水环境治理、城市雨洪管理等工程设计与研究工作。

E-mail: zhangxianzhongcq@163.com

收稿日期:2019-07-22