

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.05.016

正渗透技术浓缩剩余活性污泥的可行性

钟慧慧¹, 沈玉芳¹, 孜亚¹, 易夏文¹, 王新华^{1,2,3}

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 江苏无锡 214122; 2. 江苏省生物质能与减碳技术工程实验室, 江苏无锡 214122; 3. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 江苏苏州 215009)

摘要: 针对剩余污泥浓缩工艺存在的浓缩效果差、上清液污染物浓度高等问题,基于正渗透(FO)膜分离技术具有污染物截留性能好和膜污染趋势小等特点,进行了FO浓缩剩余污泥工艺(FST)长期运行的可行性研究。结果表明,当剩余污泥浓度在5 g/L左右时,经过13 d的运行,FST工艺将剩余污泥的悬浮固体浓度(MLSS)和挥发性悬浮固体浓度(MLVSS)分别提升至30和12.5 g/L以上,实现了剩余污泥的浓缩目标。同时,FST工艺的出水水质明显优于微滤膜浓缩工艺(MST)和重力浓缩工艺,达到了直接排放或者作为城市杂用水进行回用的要求。此外,在浓缩效率相当的情况下,FST工艺比MST工艺的膜污染更轻。FST工艺在实现污泥浓缩的同时解决了浓缩上清液的出路问题,在城市污水处理厂剩余污泥浓缩领域具有较好的应用潜力。

关键词: 正渗透; 污泥浓缩; 剩余污泥; 城市污水; 出水回用

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)05-0099-06

Feasibility of Forward Osmosis Technology for Thickening Waste Activated Sludge

ZHONG Hui-hui¹, SHEN Yu-fang¹, ZI Ya¹, YI Xia-wen¹, WANG Xin-hua^{1,2,3}

(1. School of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Engineering Laboratory for Biomass Energy and Carbon Reduction Technology, Wuxi 214122, China; 3. Jiangsu Cooperative Innovation Center of Technology and Material of Water Treatment, Suzhou 215009, China)

Abstract: This paper investigated the feasibility of forward osmosis (FO) for thickening waste activated sludge (FST) in long-term operation based on the advantages of FO (such as good pollutant retention performance and resistance to membrane fouling), so as to solve the problems such as low thickening efficiency of sludge and high concentration of pollutants in supernatant of waste activated sludge (WAS) thickening process. When the concentration of WAS was approximately 5 g/L, the mixed liquor suspended solid concentration (MLSS) and mixed liquor volatile suspended solid concentration (MLVSS) of WAS were increased to more than 30 g/L and 12.5 g/L respectively after 13 days of operation, and the goal of WAS concentration was realized. In addition, the effluent quality of the FST process was obviously better than that of the microfiltration membrane thickening process (MST) and traditional gravity

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978312); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(JNHB-014)

通信作者: 王新华 E-mail: xhwang@jiangnan.edu.cn

thickening process, which met the requirements of direct discharge or reuse as municipal miscellaneous water. Finally, the FST process had slighter membrane fouling than that of the MST process with equivalent thickening efficiency. FST process is capable of realizing simultaneous sludge thickening and safe discharge of sludge supernatant, which has good application potential in the field of WAS thickening in municipal wastewater treatment plants.

Key words: forward osmosis; sludge thickening; waste activated sludge; municipal wastewater; effluent reuse

随着城市污水处理量的增加和处理程度的提高,作为污水处理副产物的剩余污泥量在逐年增加^[1-2]。由于处理成本高且容易产生二次污染^[3],剩余污泥的处理处置已经成为社会关注的热点。污泥浓缩作为剩余污泥处理处置的第一个环节,起到初步降低污泥体积以利于后续处理的作用。针对传统重力浓缩工艺存在占地面积大、污泥浓缩效果差、上清液污染物浓度高等问题,科研人员提出了利用微滤(MF)膜分离技术进行剩余污泥浓缩的工艺(MST)^[4]。相对于传统的重力浓缩工艺,MST工艺具有占地面积小、剩余污泥浓缩效率高、固体回收率高、上清液污染物浓度低等优点。然而,MST工艺仍然存在膜污染严重、膜出水无法达标排放等瓶颈问题。

近年来,正渗透(FO)膜分离技术受到越来越多的关注。FO技术利用膜两侧的渗透压差使水分子自发地从水化学势高的原料液侧渗透到水化学势低的汲取液侧。由于FO过程不需要外加压力且膜孔径与反渗透膜相当,FO膜比MF膜具有更好的污染物截留效果和更小的膜污染趋势^[5-6]。基于FO技术的特点,有研究者提出采用FO膜进行剩余污泥浓缩(FST),在保证污泥浓缩效果的同时利用FO膜的高效截留能力实现膜出水的达标排放甚至回用,克服原有MST工艺存在的不足^[7-11]。然而,在已有的报道中,FST工艺的运行时间一般不超过30 h,缺少在长期运行条件下FO对污泥浓缩效果的研究^[7-10]。此外,现有报道缺少对FO膜出水水质和FO膜污染的系统分析^[9,11]。因此,为了验证FST工艺长期运行的可行性,笔者以城市污水处理厂的剩余活性污泥作为研究对象,考察了两个连续运行周期FST工艺的污泥浓缩效果、FO膜出水水质、膜通量和膜污染等。

1 材料与方法

1.1 实验装置

FST工艺流程如图1所示。FST工艺包括进泥系统、污泥浓缩装置、汲取液系统和曝气系统。贮泥罐中的剩余污泥(浓度为4~5 g/L)由蠕动泵注入污泥浓缩装置。污泥浓缩装置的有效容积为3.8 L,内设一片FO膜组件(其活性层朝向污泥混合液),并配有液位控制器来维持污泥液位稳定。FO膜组件采用三醋酸纤维(CTA)材质的FO膜片,其有效面积为0.024 m²。汲取液系统由1和5 mol/L NaCl溶液组成。汲取液的循环速率为0.4 L/min,通过在线电导率控制仪维持汲取液浓度的稳定,即当汲取液电导率值低于1 mol/L NaCl溶液对应的电导率时,浓盐泵将5 mol/L的NaCl溶液打入汲取液罐,直至汲取液电导率恢复到设定值。

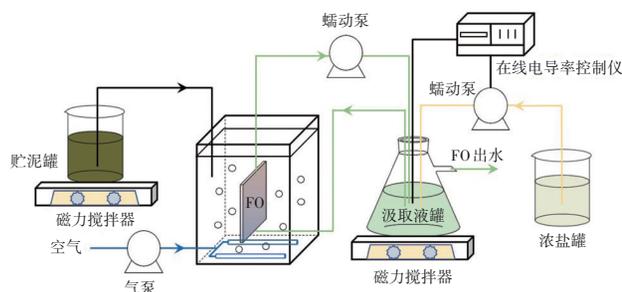


图1 FST工艺流程

Fig.1 Flow chart of FST process

为了减缓FO膜污染并维持微好氧环境防止氮磷释放,在FO膜组件底部安装了穿孔管进行曝气,曝气量控制在7 L/min左右。FST工艺运行过程中的温度始终维持在25~30 ℃。由于在污泥浓缩过程中不需要排泥,FST工艺的污泥停留时间(SRT)等于工艺的运行时间(约13 d)。由于FO膜通量会随着运行时间的延长逐渐衰减,FST工艺的水力停留时间(HRT)也会随着FO膜通量的变化而变化(整个运行过程的HRT为26.6~52.8 h)。

1.2 剩余活性污泥

实验所用剩余活性污泥取自无锡芦村污水处理厂,过筛去除砂砾等大颗粒后备用。剩余污泥的悬浮固体浓度(MLSS)为 (4.6 ± 0.8) g/L,挥发性悬浮固体浓度(MLVSS)为 (2.0 ± 0.5) g/L,MLVSS/MLSS为 0.44 ± 0.06 ,黏度为 (4.8 ± 2.5) mPa·s。

1.3 分析方法

FO膜通量采用单位时间内通过单位膜面积的透水量来表示,单位为 $L/(m^2 \cdot h)$ 。反应器中污泥混合液的电导率采用便携式电导率仪测定。MLSS、MLVSS、进泥上清液、浓缩污泥上清液以及FO膜出水的 NH_4^+-N 、 $NO_3^- - N$ 、 $NO_2^- - N$ 、TN和TP浓度均采用《水和废水监测分析方法》(第4版)进行测定。进泥上清液、浓缩污泥上清液、FO膜出水的有机物浓度采用TOC分析仪测定。溶解性微生物产物(SMP)和附着性胞外聚合物(BEPS)分别采用离心过滤法和热水浴离心法进行提取。首先从反应器中取20 mL污泥混合液置于离心管中,在8 000 r/min、4 °C下离心10 min,经过 $0.45 \mu m$ 滤膜过滤后的上清液即为SMP;将上述沉淀污泥重新悬浮于等体积去离子水中,随后在80 °C下水浴30 min,待冷却后于12 000 r/min、4 °C下离心15 min,过滤后得到的上清液即为BEPS。SMP和BEPS的含量以蛋白质和多糖含量的加和来表示。蛋白质和多糖含量分别采用福林酚法和苯酚-硫酸法测定。

FST工艺运行结束以后,对FO膜污染进行分析。首先截取 $5 cm \times 5 cm$ 的FO污染膜,将膜面污染物轻轻刮下,从而获得膜面的可逆污染物,再将去除可逆污染物的FO膜通过超声(50 Hz, 10 min)提取不可逆污染物。FO膜的可逆污染物和不可逆污染物的总固体(TS)和挥发性固体(VS)浓度采用《水和废水监测分析方法》(第4版)进行测定。此外,截取 $1 cm \times 1 cm$ 的FO污染膜,在35 °C下烘干以后用场发射电子显微镜(FE-SEM)观察污染膜的形态,并通过X射线能谱分析仪(EDS)分析污染膜面的元素种类。

2 结果与讨论

2.1 污泥浓度的变化

FST工艺进行了两个周期的剩余污泥浓缩实验。具体来说,第一个周期运行结束后排出反应器中的浓缩污泥,然后对FO膜进行物理清洗,注入新

的剩余污泥后进行第二个周期的污泥浓缩。两个连续运行周期内污泥浓度的变化见图2。可以看出,当进泥浓度为5 g/L左右时,经过13 d的运行,FST工艺在两个运行周期内都可以将剩余污泥的MLSS和MLVSS分别提升到30 g/L和12.5 g/L以上,实现了污泥浓缩。与MST工艺相比,FST工艺获得了相同的剩余污泥浓缩效果,满足了污泥浓缩要求。由于采用曝气来缓解FO膜污染,FST工艺运行过程中始终维持微好氧环境(DO浓度为1~2 mg/L),导致MLSS和MLVSS的累积消解率分别达到20%和22%左右,在一定程度上实现了剩余污泥减量化。

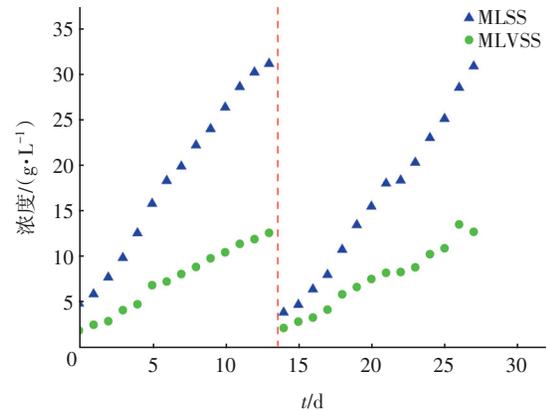
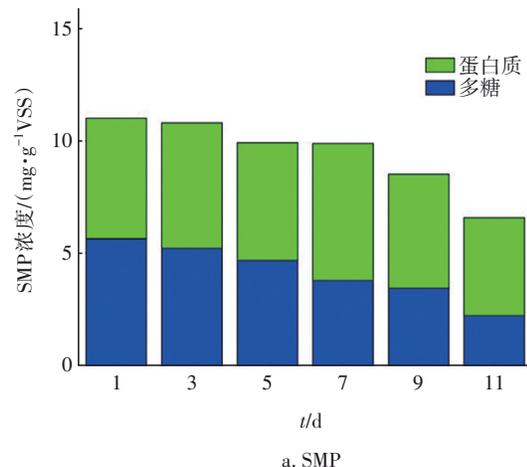


图2 FST工艺运行过程中污泥浓度的变化

Fig.2 Variation of sludge concentration during the operation of FST process

污泥消解过程一般伴随着EPS的变化。为了进一步验证污泥浓缩过程中污泥减量来自消解,对FST工艺运行过程中SMP和BEPS的变化进行了分析,结果如图3所示。可以看出,在FST工艺运行过程中EPS呈现逐渐下降的趋势,其中BEPS的下降趋势明显,而SMP的下降趋势相对缓慢。



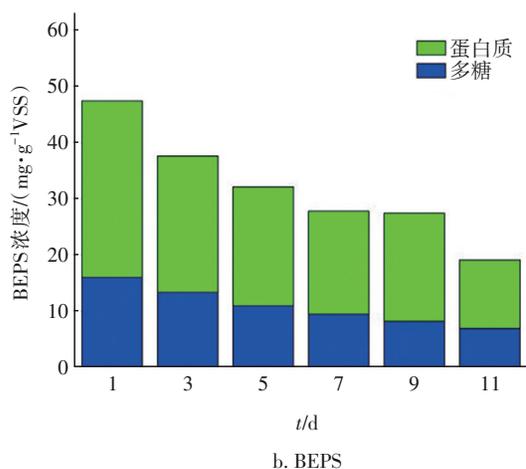


图3 FST工艺运行过程中SMP和BEPS浓度的变化

Fig.3 Variation of SMP and BEPS concentrations during the operation of FST process

在污泥浓缩过程中,由于缺乏营养物质,EPS容易被微生物利用,造成EPS浓度下降。在EPS降解过程中,主要是BEPS被微生物降解为小分子有机物释放到混合液中,成为SMP的一部分,因此SMP的浓度下降程度不大。上述EPS的变化趋势进一步佐证了FST工艺运行过程中确实存在一定量的污泥消化。

2.2 FO膜通量和混合液电导率的变化

FST工艺运行过程中FO膜通量与污泥混合液电导率的变化如图4所示。可以看出,在FST工艺运行过程中,反应器中污泥混合液电导率不断上升,第一个周期从最初的7.6 mS/cm升高到21.2 mS/cm,而第二个周期从最初的7.1 mS/cm升高到18.2 mS/cm。盐度积累主要归因于污泥浓度的升高和汲取液溶质的反向扩散。为了区分二者对盐度积累的贡献,借助将剩余污泥静沉浓缩到30 g/L的对比实验,分别计算了污泥浓度升高和反向盐扩散导致的盐度积累值。结果表明,污泥浓度升高导致的盐度积累值小于3 mS/cm,而两个运行周期的反向盐扩散导致的盐度积累值分别为13.3和10.8 mS/cm,这说明FST工艺运行过程中盐度积累主要归因于反向盐扩散。此外,根据已报道的反向扩散通量的计算方法^[6],FST工艺在两个运行周期中反向盐扩散通量分别为3.52和2.64 g/(m²·h)。与电导率的变化相反,FO膜的运行通量呈现不断下降的趋势,第一个周期由最初的6.04 L/(m²·h)下降到第13天的3.04 L/(m²·h),而第二个周期由最初的5.36 L/(m²·h)下降到第13天的2.97 L/(m²·h)。根

据已有的文献报道,FO膜通量的下降主要归因于盐度积累和膜污染^[12]。为了区分盐度积累和膜污染对FO膜通量衰减的贡献,在第一个运行周期结束后,对FO膜进行了物理清洗(采用海绵擦拭和水流冲洗的方式去除可逆污染物质),随后将FO膜投入第二个周期。结果表明,在FST工艺的第二个运行周期,FO膜通量的变化与第一个周期相似,这说明膜污染对FO膜通量衰减的贡献不大,盐度积累是导致FO膜通量衰减的主因。此外,第二个运行周期的FO膜初始通量略低于第一个周期的,说明FO膜存在一定的不可逆污染,但是经过物理清洗后FO膜初始通量恢复了90%左右,表明可逆污染是FO膜的主要污染类型。

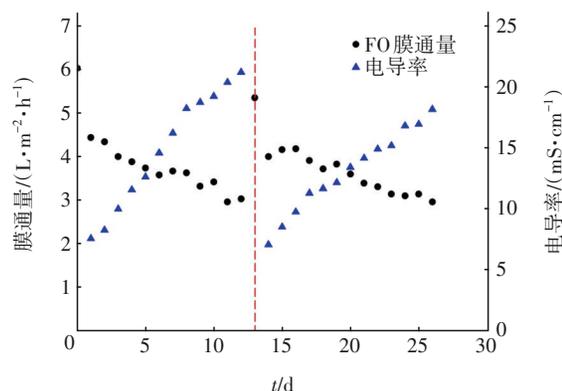


图4 FST工艺运行过程中FO膜通量与污泥混合液电导率的变化

Fig.4 Variation of FO membrane flux and conductivity of mixed liquors during the operation of FST process

2.3 出水水质情况

FST工艺运行过程中进泥上清液、浓缩污泥上清液和FO膜出水的水质见表1。可以看出,由于工艺运行过程中伴随着剩余污泥的消化和污泥浓度的升高,浓缩污泥上清液中各项水质指标的浓度均高于进泥上清液。然而,由于FST工艺维持在微好氧环境,浓缩污泥上清液并未出现大量NH₄⁺-N释放到上清液中的现象,与此同时浓缩污泥上清液中的NO₃⁻-N浓度却在不断上升。由于FO膜的高效截留能力,FO膜出水中的TOC浓度小于3 mg/L, NH₄⁺-N和TN浓度分别小于0.3和9 mg/L, TP更是检测不出。为了实现NaCl和水的分离,FO膜出水一般还会采用纳滤、膜蒸馏和反渗透等技术进行处理。考虑到实际运行的要求,FST工艺将会采用反渗透进行汲取液溶质和水的分离。在FST工艺运行过程

中,FO膜出水的TOC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN和TP浓度均可以达到《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)和《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,可以直接排放或回用。相比于MST工艺与传统的重力浓缩工艺^[4,13],FST工艺的出水水质具有明显优势。

表1 进泥上清液、浓缩污泥上清液和FO膜出水水质

项 目	TOC	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	TN	TP
进泥	9.10±	0.49±	7.26±	7.75±	0.42±
上清液	2.85	0.51	3.25	3.39	0.41
浓缩污泥	19.50±	0.57±	21.50±	22.10±	0.71±
上清液	6.32	0.41	8.64	8.74	0.64
FO膜出水	1.99± 0.72	0.12± 0.13	4.91± 2.94	5.04± 3.04	—

2.4 膜污染分析

FST工艺运行两个周期后污染的FO膜与物理清洗后的FO膜的照片如图5(a)、(b)所示。可以发现,FO膜表面有一层明显的污染物,但是经过简单的物理清洗后,FO膜表面的污染物基本被去除。这表明在FST工艺运行过程中FO膜污染以可逆污染为主,与前面获得的结论一致。与MST工艺相比,在相同的污泥浓度下,FST工艺的膜污染更轻且通量恢复率更高,这充分说明了FO膜在高污泥浓度下具有更好的抗污染能力,更适合污泥浓缩。

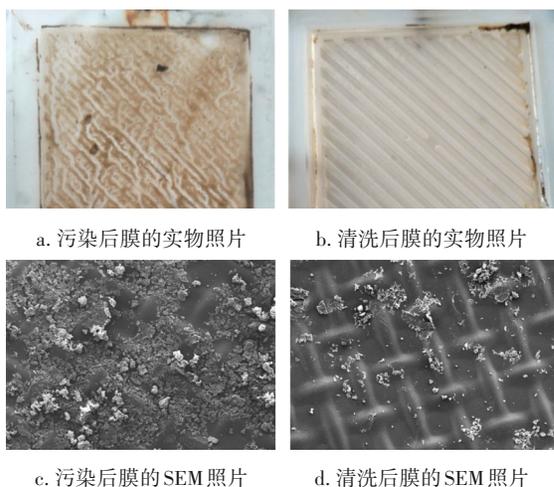


图5 FST工艺运行两个周期后污染膜与清洗后膜的照片
Fig.5 Photos of fouled and cleaned FO membranes after operating two cycles of FST process

为了进一步分析FO膜面污染物的形貌特征,

在运行结束后借助SEM对污染的FO膜和物理清洗后的FO膜进行了分析,见图5(c)、(d)。可以看出,污染的FO膜表面明显覆盖着一层污染物,不过FO膜的网状结构依稀可见,这说明在污泥浓度持续上升的FST工艺中FO膜的污染并不严重。经过物理清洗后,FO膜面还是残留了少量污染物质,但是FO膜的结构基本显现出来。

为了进一步了解FO膜表面污染物质的组成,分别对FO膜面的可逆污染物和不可逆污染物进行了分析,结果表明,可逆污染物的TS为50.58 g/m²,远大于不可逆污染物的(18.40 g/m²),且二者都以有机物和微生物为主(其VS/TS分别为0.84和0.91)。FO膜面的有机物和微生物主要来自浓缩污泥的EPS^[14]。EDS分析结果表明,FO污染膜表面C、O、Fe、Si、N元素的占比分别为49.4%、39.5%、4.1%、1.7%和1.4%,物理清洗后FO膜表面相应的元素占比分别为40.8%、36.3%、5.7%、3.5%和3.3%,可见膜表面的元素组成变化不大,这也说明了物理清洗的局限性,并不能去除不可逆污染物。此外,相比于新膜表面仅含有C、O、S三种元素^[15],新增的N元素说明FO膜表面存在微生物或者有机物,Si、Fe等元素的出现说明FO膜表面也存在一定的无机污染物。

3 结论

① FST工艺经过13 d的运行,在维持进泥浓度为4~5 g/L的条件下,成功地将剩余污泥MLSS浓缩到30 g/L以上。同时,出水水质满足《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)和《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,可以直接排放或者作为城市杂用水进行回用。

② FO膜的抗污染能力强,FST工艺膜污染以可逆污染为主,简单的物理清洗可达到约90%的通量恢复率。FO膜面可逆污染物的TS远大于不可逆污染物的,且均以有机物和微生物为主。FST工艺运行过程中FO膜通量下降主要归因于污泥浓度上升和反向盐渗透导致的盐度积累而不是膜污染。

参考文献:

[1] 王凤仙. 温度对剩余活性污泥性能的影响研究[J]. 中国给水排水,2018,34(1):86-88.

WANG Fengxian. Impact of temperature on performance

- of excess sludge[J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(1): 86-88(in Chinese).
- [2] 王亮,董慧峪,强志民. 活性污泥工艺中微量污染物生物降解机制研究进展[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(2): 18-23.
- WANG Liang, DONG Huiyu, QIANG Zhimin. Research progress on biodegradation mechanisms of trace pollutants in activated sludge process [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(2): 18-23 (in Chinese).
- [3] 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 Xiaodi, CHEN Qi, LI Ji, *et al.* Ultimate approach to handle excess sludge: incineration and drying [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(4): 35-42 (in Chinese).
- [4] WANG Z W, WU Z C, HUA J, *et al.* Application of flat-sheet membrane to thickening and digestion of waste activated sludge (WAS) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 154(1/3): 535-542.
- [5] 程丽华,杨唐,毕学军,等. 不同因素对正渗透膜截留污染物效果的影响[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(7): 118-122.
- CHENG Lihua, YANG Tang, BI Xuejun, *et al.* Effect of different factors on pollutants removal efficiency of forward osmosis membrane [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(7): 118-122(in Chinese).
- [6] 李玲. 基于膜面污染物中钙离子提取的正渗透膜有机污染控制措施的研究[D]. 无锡:江南大学, 2019.
- LI Ling. Mitigating Organic Fouling of Forward Osmosis Membrane via Directly Extracting Calcium from the Deposited Foulants on Membrane Surface [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019(in Chinese).
- [7] VIET N D, IM S J, JANG A. Characterization and control of membrane fouling during dewatering of activated sludge using a thin film composite forward osmosis membrane [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 396: 122736.
- [8] SUN F, LU D, HO J S, *et al.* Mitigation of membrane fouling in a seawater-driven forward osmosis system for waste activated sludge thickening [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241: 118373.
- [9] SOUSA M R S, LORA-GARCIA J, LÓPEZ-PÉREZ M. Experimental study and modeling of forward osmosis process for activated sludge concentration by using residual brine from a stuffed olive factory as draw solution [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2017, 21: 143-153.
- [10] LEE S, SHON H K, HONG S. Dewatering of activated sludge by forward osmosis (FO) with ultrasound for fouling control [J]. *Desalination*, 2017, 421: 79-88.
- [11] NG D Y F, WU B, CHEN Y F, *et al.* A novel thin film composite hollow fiber osmotic membrane with one-step prepared dual-layer substrate for sludge thickening [J]. *Journal of Membrane Science*, 2019, 575: 98-108.
- [12] 方舟,高悦,梁鹏,等. 正渗透膜浓缩生活污水效果及膜过程特性[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(5): 40-44.
- FANG Zhou, GAO Yue, LIANG Peng, *et al.* Membrane process and performance of forward osmosis for concentrating synthetic sewage [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(5): 40-44(in Chinese).
- [13] 王莉,杨永哲,李林辉,等. 富磷剩余污泥重力浓缩过程中各参数的变化特征[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(1): 37-40.
- WANG Li, YANG Yongzhe, LI Linhui, *et al.* Parameter variation characteristics of phosphorus-rich sludge during gravity thickening [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(1): 37-40(in Chinese).
- [14] 朱卫军. 基于高污泥浓度的一体式微滤-正渗透膜生物反应器的构建及其运行性能研究[D]. 无锡:江南大学, 2018.
- ZHU Weijun. Performance of an Integrated Microfiltration-Osmotic Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment at High Sludge Concentration [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018(in Chinese).
- [15] WANG X H, WANG C, TANG C Y, *et al.* Development of a novel anaerobic membrane bioreactor simultaneously integrating microfiltration and forward osmosis membranes for low-strength wastewater treatment [J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 527: 1-7.

作者简介:钟慧慧(1999-),女,浙江温州人,本科,主要研究方向为膜分离技术。

E-mail: 326816569@qq.com

收稿日期: 2020-10-10

修回日期: 2020-12-14

(编辑:任莹莹)