

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.17.015

## 生活垃圾渗滤液膜滤浓缩液的蒸发特性

肖冬杰, 田黎黎, 刘李柱, 李方志, 周俊, 蔡斌, 刘波  
(湖南军信环保股份有限公司, 湖南长沙 410000)

**摘要:** MBR+膜法是生活垃圾渗滤液的主流处理工艺之一,但在处理过程中会产生20%~30%的膜滤浓缩液,其盐分及不可生物降解有机物含量均较高,目前主要采用蒸发技术进行处理。利用模拟蒸发装置处理湖南某生活垃圾填埋场的膜滤浓缩液,考察不同预处理方式及蒸发压力下沸点变化情况以及超高倍浓缩后釜底液特性。结果表明,在相同条件下,负压蒸发沸点温度显著低于常压蒸发,但沸点温升均高于常压蒸发。预处理方式对不同压力下蒸发的初始沸点温升( $<2^{\circ}\text{C}$ )及常压蒸发下的终点沸点温升( $7\sim 8^{\circ}\text{C}$ )无显著影响,但调酸及除有机物可降低负压蒸发终点沸点温升 $5\sim 7^{\circ}\text{C}$ 。经20倍负压蒸发浓缩后,釜底液无机成分主要为钠/钾盐,有机成分主要为富里酸类。

**关键词:** 生活垃圾渗滤液; 膜浓缩液; 蒸发; 沸点温升; 釜底液

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)17-0098-06

## Evaporation Characteristics of Concentrate from Membrane Filtration of Domestic Landfill Leachate

XIAO Dong-jie, TIAN Li-li, LIU Li-zhu, LI Fang-zhi, ZHOU Jun, CAI Bin,  
LIU Bo

(Hunan Junxin Environmental Protection Co. Ltd., Changsha 410000, China)

**Abstract:** The process consisting of MBR and membrane filtration is one of the mainstream treatment processes for domestic landfill leachate. During the treatment process, 20% to 30% of membrane filtration concentrate is generated, which contains a high level of salt and non-biodegradable organic matters. Currently, evaporation is predominantly employed for its treatment. A simulated evaporation apparatus was employed to handle the membrane filtration concentrate from a domestic landfill in Hunan Province. The variations of boiling point under diverse pretreatment approaches and evaporation pressures as well as the features of the bottom residue after ultra-high concentration were examined. Under the identical conditions, the boiling point temperature of negative pressure evaporation was conspicuously lower than that of atmospheric pressure evaporation, yet the increase in boiling point temperature was higher than that of the atmospheric pressure evaporation. The pretreatment methods had no substantial impact on the increase in the initial boiling point rise (less than  $2^{\circ}\text{C}$ ) and the increase in the endpoint boiling point rise ( $7\sim 8^{\circ}\text{C}$ ) under different pressure evaporation. However, acid regulation and the removal of organic matters could reduce the endpoint boiling point rise of negative pressure evaporation by  $5\sim 7^{\circ}\text{C}$ . After undergoing negative pressure evaporation and concentration for 20 times, the

基金项目: 长沙市科技计划项目(kh2201443)

通信作者: 肖冬杰 E-mail: dongjieshoki@163.com

inorganic component of the bottom residue mainly consisted of sodium/potassium salts, and the organic component mainly comprised fulvic acid.

**Key words:** domestic landfill leachate; membrane filtration concentrate; evaporation; rise of boiling point; bottom residue

渗滤液处理系统作为生活垃圾处理的配套设施,主要采用膜生物反应器+膜深度处理工艺,而膜深度处理将产生相当于处理量 20%~30% 的膜滤浓缩液<sup>[1-2]</sup>。该部分膜滤浓缩液的含盐量及不可生物降解有机物含量均较高,污染物成分复杂,处理难度较大,环境危害性较强<sup>[3-4]</sup>。蒸发是膜滤浓缩液的主要处理工艺之一<sup>[5]</sup>,其中蒸汽机械再压缩技术(MVR)因对外界热源需求小,广泛应用于各类溶液的蒸发浓缩及物料结晶过程<sup>[6-7]</sup>。物料沸点温升及釜底液特性对该技术的设计及运行影响较大<sup>[8-9]</sup>。目前对于 MVR 处理膜滤浓缩液的研究主要集中于预处理效果、蒸发过程中不同污染物的转移特性及蒸发运行稳定性等方面,而对膜滤浓缩液在不同压力及预处理后的沸点温升变化特性研究相对较少。笔者以膜滤浓缩液为研究对象,分析不同预处理方式及蒸发压力下的沸点温升变化及高倍浓缩后的釜底液成分,揭示不同条件下膜滤浓缩液的蒸发特性,旨在为相关处理工艺的设计及运行提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,由真空泵、电热套、烧瓶、冷凝管、温度计及其他辅助配件搭建而成。常压蒸发压力为 101 kPa,负压蒸发压力为(26±2) kPa,每次实验后更换新的烧瓶用于下一组实验。每批次实验水样为 2 L,浓缩倍数以冷凝水量计算。

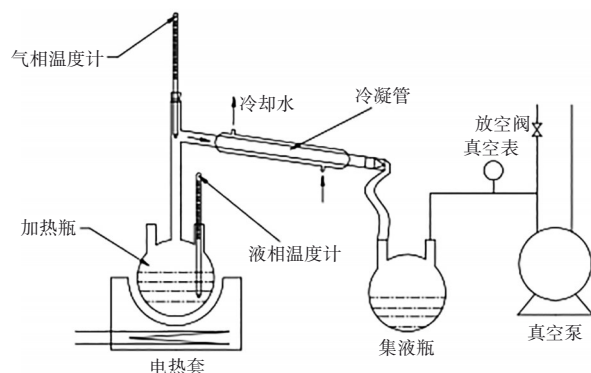


图 1 实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

### 1.2 实验材料

膜滤浓缩液取自湖南某生活垃圾填埋场渗滤液处理系统浓缩液池,渗滤液处理工艺为 MBR+RO。对浓缩液原液分别进行预处理:浓缩液调酸组用盐酸调节 pH 至 5;除硬组为添加石灰及碳酸钠并沉淀 30 min 后的上清液;除有机物组为经 NF270-400 纳滤膜(截留分子质量为 200~400 u)分离后的产水;碟管式反渗透组(DT 组)为除硬组经 PFG-RO4 碟管膜进一步浓缩 50% 后的浓液。

### 1.3 检测项目及方法

pH 与电导率采用 pH 计及电导率仪测定;溶解性总固体(TDS)、COD、钙离子、镁离子和二氧化硅分别采用重量法、重铬酸钾法、乙二胺四乙酸二钠滴定法、差减法和钼酸铵分光光度法测定;钠、钾、氯、氟化物及硫酸盐等离子浓度参照 HJ 84—2016 及 HJ 812—2016 测定。三维荧光光谱分析采用荧光光谱仪,激发光源为氙灯,固定激发波长狭缝为 5 nm,扫描速度为 2 400 nm/min,激发波长( $\lambda_{Ex}$ )为 200~400 nm,发射波长( $\lambda_{Em}$ )为 250~600 nm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同预处理方式对水质的影响

不同预处理方式下膜滤浓缩液水质见表 1。

表 1 浓缩液水质情况

Tab.1 Water quality of the concentrate

项 目	原液组	除硬组	除有机物组	DT 组
pH	7.20	9.69	8.05	7.96
电导率/( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	35 300	41 490	33 100	84 170
TDS/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	28 100	31 320	27 583	65 920
COD/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	2 235	2 167	551	5 094
$\text{Na}^+$ /( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	5 413	7 688	4 770	18 767
$\text{K}^+$ /( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	4 040	4 103	3 906	9 295
$\text{Cl}^-$ /( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	10 821	9 270	7 163	24 958
$\text{SO}_4^{2-}$ /( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	1 210	1 038	141	2 254
$\text{Ca}^{2+}$ /( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	720	16	632	42
$\text{Mg}^{2+}$ /( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	305	52	221	93
$\text{SiO}_2$ /( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	124	32.9	164	76

在各类预处理方式中,除硬组的钙、镁、硅浓度

均大幅下降,而电导率与TDS浓度小幅上升;除有机物组受纳滤分离过程中道南效应、离子水合半径及膜表面电荷的影响<sup>[10-11]</sup>,COD及硫酸根浓度大幅下降,钙、镁及一价离子小幅下降;DT组指标除pH外,其他指标基本为除硬组的2倍。

## 2.2 不同条件下沸点温升的变化

将原液组、调酸组、除有机物组分别在常压及负压下进行10倍蒸发浓缩,DT组则在常压及负压下进行超倍蒸发,不同蒸发压力下相关水质指标对蒸发特性的影响存在显著差异。不同蒸发压力下,初始pH对沸点温升的影响如图2所示。

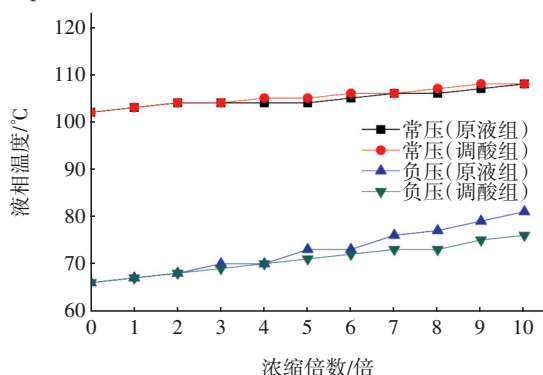


图2 初始pH对沸点的影响

Fig.2 Effect of initial pH on boiling point

由图2可知,初始pH对相应组别初始沸点及常压下终点沸点无显著影响,但对负压下终点沸点具有显著影响。常压蒸发时两个组别初始沸点温升均约为2℃,终点沸点温升均为8℃;在负压蒸发时两个组别初始沸点温升均小于1℃,但调酸组终点沸点温升为10℃,而原液组终点沸点温升为15℃,接近单级MVR浓缩极限<sup>[8]</sup>。该现象说明膜滤浓缩液在蒸发时,沸点温升同时受到蒸发压力与pH的双重影响。在蒸发压力部分呈现压力越小沸点温升数值越大的变化趋势,与梁林<sup>[12]</sup>获得的结果类似。在pH影响方面,推测降低初始pH后改变了溶液中的离子组合及有机物与金属离子的络合反应形式<sup>[13-14]</sup>,使得溶液内离子间配对变化所致。

不同蒸发压力下,硬度对沸点的影响见图3。可知,硬度对相应组别的初始沸点与终点沸点均无显著影响。常压蒸发时,初始沸点温升均为2℃,终点沸点温升均为7~8℃;负压蒸发时,初始沸点温升均小于1℃,终点沸点温升均为15℃。说明采用“石灰+碳酸钠”除硬时,硬度的变化对溶液沸点温升均无显著影响。

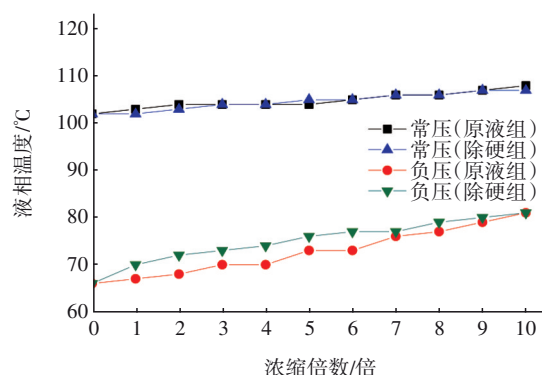


图3 硬度对沸点的影响

Fig.3 Effect of hardness on boiling point

不同蒸发压力下,有机物对沸点的影响如图4所示。可知,有机物浓度对相应组别初始沸点及常压下终点沸点无显著影响,但对负压下终点沸点则存在显著影响。常压蒸发时,两个组别的初始沸点温升为1~2℃,终点沸点温升为7~8℃;负压蒸发时,两个组别的初始沸点温升均小于1℃,但除有机物组终点沸点温升为8℃,低于其他负压组别,而原液组终点沸点温升则仍为15℃。造成该现象的原因推测为除有机物组的剩余有机物以小分子物质为主,而原液组中的有机物则以大分子腐殖酸类为主<sup>[15]</sup>,常压蒸发时,因沸点温度较高,导致大分子腐殖酸中的氢键在蒸发初始阶段即发生断链<sup>[16]</sup>,是否去除有机物对沸点温升影响不显著;而在负压蒸发时,浓缩过程中离子浓度的增加促进了腐殖酸间进一步形成氢键,而负压蒸发的沸点温度又不足以断开氢键<sup>[17]</sup>,导致原液组沸点温升持续高于除有机物组。

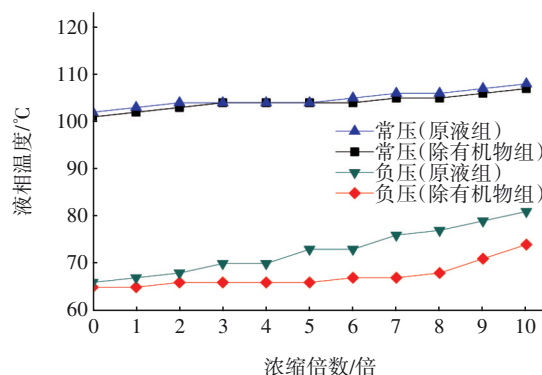


图4 有机物对沸点的影响

Fig.4 Effect of organic compounds on boiling point

不同蒸发压力下,超高倍蒸发对沸点温升的影响如图5所示。在常压蒸发浓缩7倍时(等同于原液浓缩14倍)沸点温升为12℃(溶液爆沸无法获取

稳定数值,实验停止),负压蒸发浓缩6倍时(等同于原液浓缩12倍)沸点温升为14℃,浓缩10倍时(等同于原液浓缩20倍)沸点温升为22℃。两个压力下溶液终点沸点仍呈现缓慢上升的趋势,说明其中部分盐分与有机物未达到完全饱和或沸点(分解)温度,溶液成分仍未完全趋于稳定<sup>[18]</sup>。

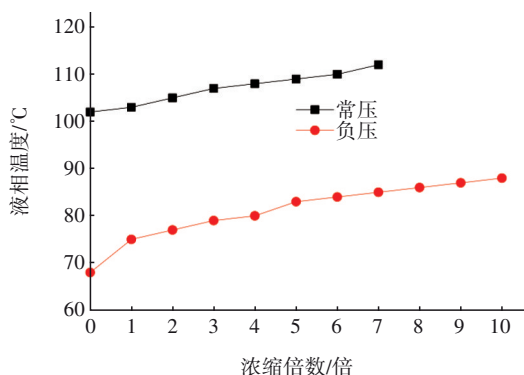


图5 DT组沸点的变化

Fig.5 Change of boiling point of DT group

## 2.3 釜底液分析

DT组负压超高倍浓缩后的釜底液中,主要成分为无机盐和腐殖酸类有机物<sup>[19]</sup>。溶解性总固体约为 $3.3 \times 10^5 \sim 4 \times 10^5$  mg/L,钠离子约为 $1.2 \times 10^5 \sim 1.5 \times 10^5$  mg/L,钾离子约为 $4.5 \times 10^4 \sim 6.0 \times 10^4$  mg/L,氯离子约为 $1.1 \times 10^5 \sim 1.4 \times 10^5$  mg/L,硫酸根约为 $1.5 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^4$  mg/L。在持续蒸发过程中或后续排料冷却时,将以氯化钠、硫酸钠、氯化钾的形式析出<sup>[20-21]</sup>。对釜底液中的有机物进行荧光分析,结果见图6。

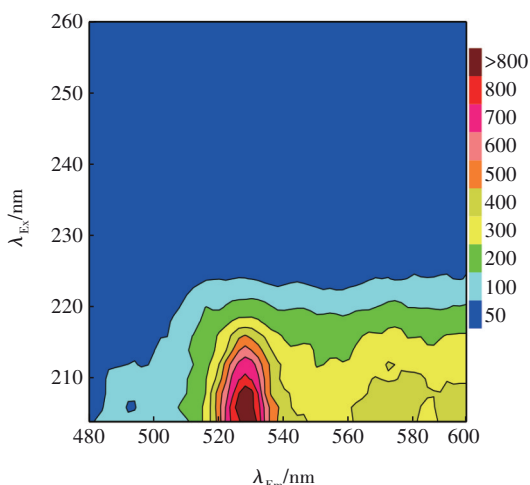


图6 蒸发残渣荧光分析结果

Fig.6 Fluorescence spectral analysis of evaporation residue

有机物激发波长区间为200~220 nm,发射波长为500~550 nm,说明有机物的主要成分为富里酸,进一步证明了上述对原液组有机物成分的推测。高倍浓缩后,有机物导致釜底液的整体黏性变大,若裹附析出的无机盐附着于换热面或管道壁面时,将影响蒸发的持续稳定性<sup>[22]</sup>。

建议后续类似工程项目在进行设计时,应着重优化蒸发器或增稠器的盐腿结构设计,便于高黏度析出物的富集与排放<sup>[23]</sup>。若整体工艺前端设有除有机物及硬度的工艺单元,后端蒸发及釜底液的处理可进一步考虑采用分盐设计<sup>[24]</sup>,以实现釜底液中无机盐的二次回收利用。

## 3 结论

① 渗滤液膜滤浓缩液进行常压蒸发时,各种预处理方式对沸点温升无显著影响,各组别初始沸点温升为1~2℃,终点沸点温升为7~8℃,且均低于同等条件下负压蒸发数值。

② 渗滤液膜滤浓缩液进行负压蒸发时,各种预处理方式对初始沸点无显著影响。前置调酸与除有机物可降低终点沸点温升约5~7℃,前置除硬则对终点沸点温升无影响。

③ 渗滤液膜滤浓缩液进行12~20倍浓缩后,釜底液主要成分为钠/钾盐与富里酸。在持续蒸发过程中或后续排料冷却时,无机成分将以氯化钠、硫酸钠、氯化钾的形式析出。

④ 后续项目设计时应结合蒸发压力与前置预处理方式,优化末端反应器排放结构或增设分盐单元,以提高系统的稳定性与经济性。

## 参考文献:

- [1] 王凯, 武道吉, 彭永臻, 等. 垃圾渗滤液处理工艺研究及应用现状浅析[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(1): 1-12.  
WANG Kai, WU Daoji, PENG Yongzhen, et al. Critical review of landfill leachate treatment technologies [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(1): 1-12(in Chinese).
- [2] 徐昌文, 王声东. 垃圾渗滤液及膜滤浓缩液处理技术探讨与分析[J]. 环境与可持续发展, 2020, 45(5): 72-75.  
XU Changwen, WANG Shengdong. Discussion and analysis on treatment technology of leachate and membrane filtration concentrated solution [J].



- Environment and Sustainable Development, 2020, 45 (5): 72-75(in Chinese).
- [3] 丁晶, 关淑妍, 赵庆良, 等. 垃圾渗滤液膜滤浓缩液处理技术研究与应用进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(11): 1-13.
- DING Jing, GUAN Shuyan, ZHAO Qingliang, *et al.* Research and application status of treatment methods of landfill leachate membrane concentrate[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(11): 1-13 (in Chinese).
- [4] 孙浩, 李方志. 垃圾渗滤液膜滤浓缩液处理方法的研究进展[J]. 中小企业管理与科技, 2017(12): 184-187.
- SUN Hao, LI Fangzhi. The research progress of the filter concentrate treatment method of waste leachate membrane filtration[J]. Management & Technology of SME, 2017(12): 184-187 (in Chinese).
- [5] 张跃春, 黄军, 李海渊, 等. 垃圾渗滤液膜滤浓缩液处理技术综述与发展方向[J]. 广州化工, 2016, 44(7): 38-39.
- ZHANG Yuechun, HUANG Jun, LI Haiyuan, *et al.* Review of concentration liquid treatment in leachate membrane filtration and development direction [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2016, 44(7): 38-39(in Chinese).
- [6] 丁秀华. MVR技术的工业应用及发展[J]. 广州化工, 2015, 43(9): 41-42, 60.
- DING Xiuhua. Industrial application and development of mechanical vapor recompression technology [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015, 43(9): 41-42, 60(in Chinese)
- [7] 李强. 青岛市小涧西垃圾渗滤液扩建工程高排放标准工艺设计[J]. 中国给水排水, 2019, 35(18): 46-49.
- LI Qiang. Process design of high discharge standard for landfill leachate extension project in Xiaojianxi, Qingdao City[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18): 46-49(in Chinese).
- [8] 刘燕, 裴程林, 王建达, 等. 高沸点升溶液蒸发系统的设计与分析[J]. 过程工程学报, 2017, 17(4): 859-865.
- LIU Yan, PEI Chenglin, WANG Jianda, *et al.* Design and analysis of an evaporation system of solutions with high boiling point elevation[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(4): 859-865 (in Chinese).
- [9] 李强平. 机械蒸汽再压缩系统在高浓度含盐废水处理中的应用研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019: 9-10.
- LI Qiangping. Research and Application of Mechanical Vapor Recompression System for Treating High Concentration Saline Wastewater [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019: 9-10 (in Chinese).
- [10] 陈静, 张杰, 金艳, 等. 纳滤-反渗透集成处理海水淡化浓盐水处理工艺研究[J]. 水处理技术, 2017, 43(5): 113-118.
- CHEN Jing, ZHANG Jie, JIN Yan, *et al.* Study on treatment technology of concentrated brine from seawater desalination by NF and RO integrated processing [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(5): 113-118 (in Chinese).
- [11] 唐元晖, 王迪, 杨忠霖, 等. 高浓度含盐蔗糖溶液的纳滤分离实验研究[J]. 膜科学与技术, 2018, 38(4): 86-92.
- TANG Yuanhui, WANG Di, YANG Zhonglin, *et al.* Experimental study on nanofiltration separation of high concentration saline and sucrose solution[J]. Membrane Science and Technology, 2018, 38(4): 86-92 (in Chinese).
- [12] 梁林. 处理高浓度含盐废水的机械蒸汽再压缩系统设计及性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013: 15-16.
- LIANG Lin. Design and Performance Research of Mechanical Vapor Recompression System for Treating High Concentration Saline Wastewater [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013: 15-16(in Chinese).
- [13] 于颖, 詹发强, 刘连胜, 等. 酸碱度对生活垃圾焚烧厂沥滤液蒸发处理效果的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(6): 2687-2692.
- YU Ying, ZHAN Faqiang, LIU Liansheng, *et al.* Influence of pH value on efficiency of evaporation treatment of leachate from municipal solid waste incineration plant[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(6): 2687-2692(in Chinese).
- [14] 程振杰. 蒸发法处理垃圾渗滤液试验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013: 22-24.
- CHENG Zhenjie. Experimental Study on Landfill Leachate Treatment by Evaporation Method [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013: 22-24 (in Chinese).

- [15] 潘松青,叶志隆,程蒙召,等. 垃圾填埋场渗滤液和浓缩液的蒸发特性[J]. 环境工程学报, 2017, 11(8): 4506-4512.  
PAN Songqing, YE Zhilong, CHENG Mengzhao, *et al.* Evaporation characteristics of landfill leachate and concentrate generated after MBR-NF-RO treatment process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(8): 4506-4512(in Chinese).
- [16] 赵成. 污泥热水解过程中腐殖酸氧化还原能力的变化及其对厌氧消化的影响[D]. 无锡:江南大学, 2022: 15-17.  
ZHAO Cheng. Changes of Humic Acid Redox Ability During Thermal Hydrolysis and Their Effects on Sludge Anaerobic Digestion [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022: 15-17(in Chinese).
- [17] 霍进彦,赵鹏,张宏伟,等. 基于非对称场流分离技术的水环境腐殖酸聚集特性研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(8): 2899-2904.  
HUO Jinyan, ZHAO Peng, ZHANG Hongwei, *et al.* The study of aggregation properties of aqueous humic acid based on asymmetric flow field-flow fractionation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(8): 2899-2904(in Chinese).
- [18] 乌云,杨鲁伟,张振涛,等. 高含盐有机废水蒸发浓缩分离特性实验研究[J]. 环境工程, 2015, 33(8): 8-12.  
WU Yun, YANG Luwei, ZHANG Zhentao, *et al.* Experiment research on separation characteristics in evaporative concentration of organic wastewater with high salinity[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(8): 8-12(in Chinese).
- [19] 袁志伟. 蓝藻降解对湖泊水体溶解有机质赋存影响的光谱解析研究[D]. 合肥:安徽建筑大学, 2022: 20-24.  
YUAN Zhiwei. Study on Spectral Analysis of the Effect of Cyanobacterial Degradation on the Occurrence of Dissolved Organic Matter in Lake Water [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2022: 20-24(in Chinese).
- [20] 李波,刘昌辉. 煤化工含盐废水膜浓缩液热法分盐结晶工艺蒸发终点研究[J]. 中国井矿盐, 2021, 52(1): 3-6.  
LI Bo, LIU Changhui. Study on evaporation end point of salt crystallization process of concentrated salt-containing waste water film in coal chemical industry [J]. China Well and Rock Salt, 2021, 52(1): 3-6(in Chinese).
- [21] 杜海. 煤化工高盐废水分质结晶基础研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021: 40-41.  
DU Hai. Investigation on Fractional Crystallization of High Salinity Wastewater from Coal Industry [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021: 40-41 (in Chinese).
- [22] 魏彦丹,李诗媛,吕清刚,等. 垃圾填埋场渗滤液有机物成分分析及蒸发处理研究[J]. 环境工程, 2012, 30(2): 400-405.  
WEI Yandan, LI Shiyuan, LÜ Qinggang, *et al.* Experimental study on the organic components and evaporation treatment of landfill leachate [J]. Environmental Engineering, 2012, 30(2): 400-405 (in Chinese).
- [23] 许景媛,张聪. 真空制盐盐腿设置浅析[J]. 中国井矿盐, 2010, 41(6): 3-6.  
XU Jingyuan, ZHANG Cong. Brief analysis on the set of salt leg of vacuum salt making[J]. China Well and Rock Salt, 2010, 41(6): 3-6(in Chinese).
- [24] 吴琦. 渗滤液RO浓缩液蒸发浓缩分质结晶研究[D]. 福州:福州大学, 2020: 45-48.  
WU Qi. Evaporative Concentration and Fractional Crystallization Process of Leachate Reverse Osmosis Concentrate [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2020: 45-48(in Chinese).

作者简介:肖冬杰(1990- ),男,湖南长沙人,大学本科,高级工程师,主要研究方向为污水及污泥工程建设与运行管理。

E-mail: dongjieshoki@163.com

收稿日期:2023-11-17

修回日期:2024-02-08

(编辑:任莹莹)