

混凝沉淀-气浮-ABR-AA/O-MBR 工艺处理垃圾 中转站渗滤液的试验研究

苏德欣, 付元, 马赛, 金丽丽, 程材, 肖艳*

(中煤科工集团杭州研究院有限公司, 浙江 杭州 311201)

摘要:垃圾中转站运行过程中产生的垃圾渗滤液含有大量的悬浮固体、油脂、有机物、盐分、氮类等污染物,其水质复杂且波动性大,易造成环境污染。针对浙江省某垃圾中转站渗滤液的水量和水质特点,采用混凝沉淀-气浮-ABR-AA/O-MBR 工艺进行试验研究。其中,混凝沉淀-气浮物化处理单元能有效去除渗滤液中的悬浮固体和油脂等,而 ABR-AA/O 生物处理单元则能有效去除有机物、氨氮和总氮等。试验结果表明:进水中的 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 SS 浓度分别为 15 130~20 540、278.0~413.0、289.0~437.0 和 4 330~6 317 mg/L,出水中的 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 SS 浓度分别为 134~313、0.4~0.9、46.4~65.1 和 8~14 mg/L,平均去除率分别为 98.72%、99.81%、84.91% 和 99.79%,满足《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)的要求。综合来看,此工艺具有良好的技术适应性和产业化前景。

关键词:垃圾中转站; 渗滤液; 混凝沉淀-气浮; ABR-AA/O; MBR

中图分类号: X701

文献标识码: A

Experimental study on the treatment of leachate from waste transfer station using coagulation sedimentation, air floatation, ABR, AA/O, and MBR process

SU Dexin, FU Yuan, MA Sai, JIN Lili, CHENG Cai, XIAO Yan*

(CCTEG Hangzhou Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 311201, China)

Abstract: The waste leachate generated from the operation of waste transfer stations poses a significant environmental pollution risk due to its complex and fluctuating water quality, which contains suspended solids, oil and grease, organic matter, salts, nitrogen, and other pollutants. To address this issue, an experimental study was conducted at a waste transfer station in Zhejiang Province, using a coagulation sedimentation, air flotation, ABR, and AA/O-MBR process. This multi-step treatment approach demonstrated remarkable effectiveness in treating the leachate. The coagulation sedimentation and air flotation unit successfully removed suspended solids and oil and grease from the leachate, while the ABR-AA/O biological treatment unit proved efficient in removing organic matter, ammonium nitrogen, and total nitrogen from the leachate. The experiment results showed that the influent water had initial concentrations of COD_{Cr} , $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN, and SS ranging from 15 130 to 20 540 mg/L, 278.0 to 413.0 mg/L, 289.0 to 437.0 mg/L, and 4 330 to 6 317 mg/L, respectively. After treatment, the effluent water exhibited significantly reduced concentrations, with COD_{Cr} , $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN, and SS ranging from 134 to 313 mg/L, 0.4 to 0.9 mg/L, 46.4 to 65.1 mg/L, and 8 to 14 mg/L, respectively. The average removal rates were 98.72% for COD_{Cr} , 99.81% for $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 84.91% for TN, and 99.79% for SS. The effluent quality satisfied the requirements of the Water Quality Standards for Sewage Discharge into Urban Sew-

收稿日期: 2023-12-12

DOI: 10.20078/j.eep.20240105

基金项目: 萧山区重大科技计划资助项目(2021224); 浙江省“领雁”研发攻关计划资助项目(2022C02045)

作者简介: 苏德欣(1994—), 男, 黑龙江佳木斯人, 助理工程师, 主要研究方向为水污染控制与水资源再生利用。

E-mail: sudexin2011@126.com

通讯作者: 肖艳(1984—), 女, 安徽濉溪人, 研究员, 主要研究方向为水污染控制与水资源再生利用。E-mail: hoho-xiao@163.com

ers (GB/T 31962—2015). In conclusion, the process has good technical adaptability and promising prospects for industrialization.

Keywords: Waste transfer station; Leachate; Coagulation precipitation and air flotation; ABR-AA/O; MBR

0 引言

垃圾中转站作为城市垃圾的临时储存点,对减少垃圾体积、降低垃圾运输成本、减少处置占用土地资源具有至关重要作用,是垃圾收集、运输、处置过程中重要的一环^[1]。垃圾中转站运行过程中将产生垃圾渗滤液^[2]。我国垃圾分类效果不明显,垃圾组成复杂,导致中转站渗滤液中的 COD_{Cr} (Chemical Oxygen Demand)、BOD₅ (Biochemical Oxygen Demand)、悬浮固体 (Suspended Solid, SS)、油脂、总氮 (Total Nitrogen, TN)、氨氮 (Ammonia Nitrogen, NH₄⁺-N) 等污染物浓度较高^[3-4]。若直接排入市政管网,会对终端污水处理厂造成不利影响,影响污水厂的稳定运行,严重时会导致水环境污染。

与垃圾填埋场渗滤液的水量水质特征相比^[5-6],垃圾中转站渗滤液既有相似之处又有独特之处。垃圾中的厨余以及各种有机垃圾含水率较高,易产生渗滤液,而我国垃圾成分与季节有一定的相关关系^[7-8],所以,垃圾中转站渗滤液随着季节的变化,水量也发生变化,冬季甚至出现断流现象^[9]。水质方面,由于垃圾在中转站停留时间较短,产生的渗滤液均是未矿化的新鲜滤液^[10],悬浮固体含量较高^[1],还含有较高浓度的油脂^[11]。综上,垃圾中转站渗滤液的水量水质的干扰因素复杂、难于界定,对其处理工艺的选择难度大。

生物处理法结合物理化学处理法是垃圾填埋场渗滤液处理的常规工艺,发展较成熟^[12]。生物处理法主要是厌氧消化结合活性污泥法或生物膜法去除有机物和氮,物理化学处理法主要是采用纳滤结合反渗透深度处理生物处理出水,这可以借鉴到中转站渗滤液处理中^[13-14]。然而与填埋场渗滤液相比,中转站渗滤液含有大量的悬浮固体和油脂,这些污染物为生化处理带来高负荷和堵塞的弊端,影响反应的顺利进行^[15]。垃圾中转站渗滤液中的油脂类更是危害后续反应的顺利进行,它影响好氧生物处理的充氧效果,导致生物活性降低,出水质量下降^[16]。此外,油脂类还会造成深度处理工艺的膜污染问题^[17]。因此,垃圾中

转站渗滤液的处理不能简单套用垃圾填埋场渗滤液处理工艺,采用合理、可靠的处理工艺非常必要。

本文综合考虑垃圾中转站渗滤液的水质水量特点,以实际污水为处理对象,基于污水的物化、生化处理技术,探究了混凝沉淀-气浮-厌氧折流板反应器 (Anaerobic Baffled Reactor, ABR)-厌氧-缺氧-好氧法 (Anaerobic-Anoxic-Oxic, AA/O)-膜生物反应器 (Membrane Bio-Reactor, MBR) 工艺在处理垃圾中转站渗滤液中的应用;对工艺的试验参数、污染物去除情况等方面进行分析,为该工艺广泛应用于该类型污水的处理提供工艺设计和运行调试等方面的参考。

1 试验装置与方法

1.1 试验水质

本研究所用的垃圾中转站渗滤液主要取自浙江省某垃圾中转站出水,渗滤液呈黑色或灰褐色,同时带有强烈恶臭。垃圾中转站原有隔油装置、沉淀池等,只能对渗滤液进行简单预处理,不能有效去除渗滤液中的主要污染物,且设备目前已不能高效运转。因此,将原有渗滤液处理设施进行拆除后空间再利用,建设一套渗滤液处理装置,处理能力 Q 为 50 m³/d,主体采用混凝沉淀-气浮-ABR-AA/O-MBR 工艺,产生的污泥采用叠螺压滤机压滤。排放水质达到《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)^[18] 中的排放标准,排入污水处理厂进行处理深度处理。进、出水水质指标见表 1。

表 1 进、出水水质及排放标准

Table 1 Water quality of influent and effluent and discharge standards

指标	进水	出水	mg/L, pH 无量纲
			GB/T 31962—2015
COD _{Cr}	15 130~20 540	134~313	500
NH ₄ ⁺ -N	278.0~413.0	0.4~0.9	45
TN(以 N 计)	289.0~437.0	46.4~65.1	70
SS	4 330~6 317	8~14	400
pH	4.1~5.8	7.1~7.6	6.5~9.5

1.2 试验流程

针对悬浮固体较高还含有较高浓度的油脂的水质特点,采用“混凝沉淀+气浮”串联组成的预处理单元,包括混凝反应器、混凝沉淀区,气浮反应区和气浮接触区。混凝反应区用于投加混凝剂和助凝剂等试剂进行反应,混凝沉淀区用于对反应后生成的絮体进行沉淀分离;气浮反应区用于投加助凝剂进行反应,气浮接触区用于通入高压溶气水进行气浮。针对有机物、总氮、氨氮等污染物浓度较高的水质特点,采用“ABR+AA/O”串联组成的生化处理单元。ABR 内设有若干交错排布的折流隔板,折流隔板一端与池的侧壁连接,另一

端与池的相对一侧侧壁之间形成过水通道,可延长渗滤液在 ABR 的流动路线,减小 ABR 面积的同时延长反应时间,提高处理效率。AA/O 包括相连接的厌氧池、缺氧池和好氧池,均设有活性污泥。在厌氧池,污泥中的聚磷菌进行磷的释放和低级脂肪酸等的吸收;在缺氧池,污泥中的反硝化菌将硝酸盐转化为氮气;在好氧池,污泥中的硝化细菌将氨氮氧化成硝酸盐,经好氧处理后的硝化液可由硝化液回流泵泵入缺氧池继续进行反硝化。为提高出水水质,生化反应后采用 MBR 进行深度处理,反应器内的泥水混合物部分回流到厌氧池内。垃圾中转站渗滤液处理工艺如图 1 所示。

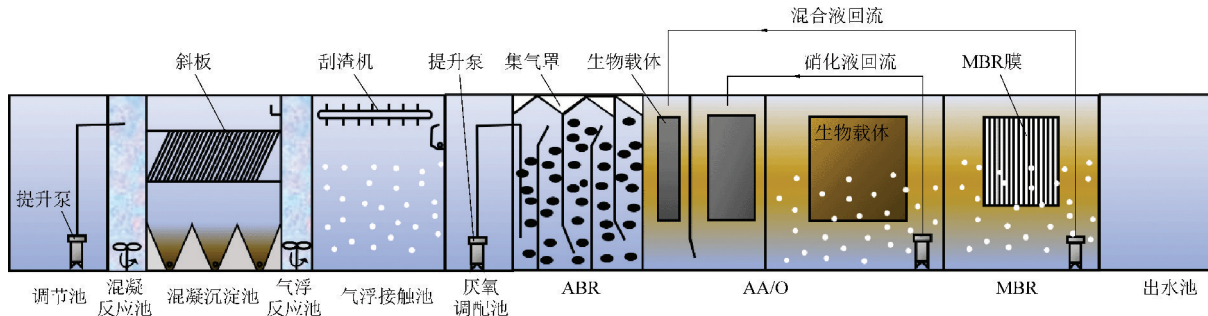


图 1 垃圾中转站渗滤液处理试验流程

Fig. 1 Treatment flow chart of leachate from the refuse transfer station

1.3 试验参数

主要试验参数详见表 2。

表 2 主要试验参数

Table 2 Main test parameters

构筑物	试验参数
混凝池	水力停留时间: 30 min 表面负荷: $1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
气浮池	表面负荷: $1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 气水比: 0.15 : 1 释放压力: $49 \text{ kPa}/\text{cm}^2$
ABR	容积负荷: $4.0 \sim 5.0 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 最大流速: $2 \text{ m}/\text{h}$ 沼气产率: $500 \text{ L}/\text{kgCOD}$
AA/O	脱氮速度: $0.034 \text{ kgN}/(\text{kgMLVSS} \cdot \text{d})$ 硝化速度: $0.035 \text{ kgN}/(\text{kgMLVSS} \cdot \text{d})$ 污泥负荷: $0.1 \text{ kgCOD}/(\text{kgMLVSS} \cdot \text{d})$ 硝化液循环量: 3~5Q 污泥浓度: $10 \text{ 000 mg}/\text{L}$
MBR	IPUF 软片膜, 材质 PVDF 膜面积: 250 m^2 膜通量: $10 \text{ L}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ 混合液回流量: 2~4Q

1.4 试验方法及设备

测试方法均采用国家标准方法。COD_{Cr}:快速

消解分光光度法; NH₄⁺-N: 纳氏试剂分光光度法; TN: 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法; SS: 重量法; COD_{Cr}: 消解、测定: 5B-6(C) 型三参数测定仪; 紫外/可见分光光度计: TU-1810PC/722G; pH: 雷磁 pHs-25。

2 结果与讨论

2.1 混凝沉淀-气浮的处理效果

以调节后的垃圾中转站渗滤液为进水(主要污染物指标见表 1), 连续运行, 对混凝沉淀-气浮组合预处理单元进行 15 周取样分析, 结果如图 2 和图 3 所示。

在混凝沉淀-气浮预处理中, 进水 SS 为 $4 \text{ 330} \sim 6 \text{ 317 mg}/\text{L}$, 平均为 $5 \text{ 270 mg}/\text{L}$, 悬浮固体含量很高, 远超垃圾填埋场渗滤液^[19]。出水 SS 在 $183 \sim 351 \text{ mg}/\text{L}$, 平均为 $258 \text{ mg}/\text{L}$, SS 去除率基本在 94% 以上, 最高达到了 96.91%。在该处理单元, 渗滤液、混凝剂和助凝剂充分混合, 通过电中和、吸附架桥和网捕的协同作用, SS 聚集并形成沉淀得以去除; 再加入助凝剂进一步反应后, 通入高压溶气水, 难以自然沉降或悬浮的乳化油和微小悬浮颗粒等污染物黏附于气泡表面并随之上浮到水

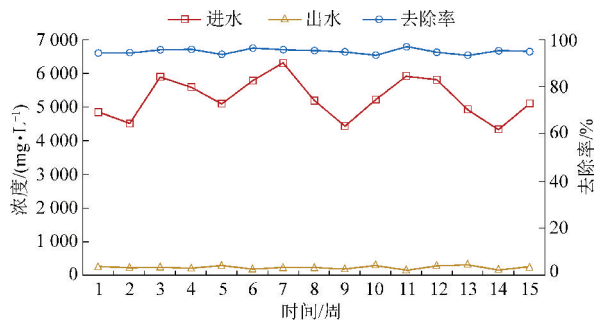


图2 混凝沉淀-气浮对SS的去除效果

Fig. 2 Removal effect of coagulation precipitation and air flotation for SS

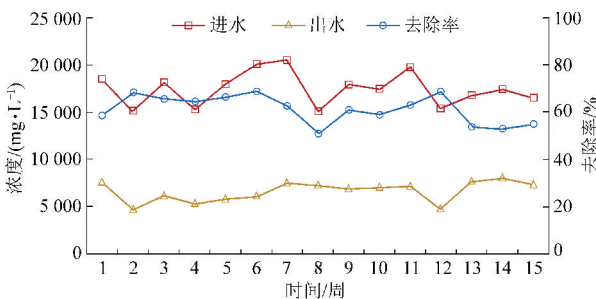


图3 混凝沉淀-气浮对COD_{Cr}的去除效果

Fig. 3 Removal effect of coagulation precipitation and air flotation for COD_{Cr}

面,通过刮渣得以去除。可见,气浮作为混凝沉淀的后续处理,提高了预处理效果。进水 COD_{Cr} 为 15 130~20 540 mg/L,平均为 17 460 mg/L,有机污染物含量较高;出水 COD_{Cr} 最高为 8 197 mg/L,最低为 4 819 mg/L,平均为 6 742 mg/L。从 COD_{Cr} 的去除率来看,均达到 50%以上,最高去除率达到了 68.93%,COD_{Cr} 的平均去除率为 61.29%。混凝沉淀-气浮处理垃圾中转站渗滤液取得良好效果,也说明了垃圾中转站渗滤液中的悬浮固体主要由 COD_{Cr} 构成。良好的预处理效果为后续生化处理减轻负担,同时也避免了反应器堵塞造成流态改变等问题。

2.2 ABR-AA/O 的处理效果

ABR-AA/O 单元对 COD_{Cr} 的去除效果如图 4 所示。进水 COD_{Cr} 为 4 819~8 197 mg/L(平均为 6 742 mg/L),进水浓度波动均较大。出水 COD_{Cr} 为 214~481 mg/L(平均为 334 mg/L),出水 COD_{Cr} 比较平稳,最高 COD_{Cr} 浓度与最低 COD_{Cr} 浓度相差 267 mg/L,仅为进水 COD_{Cr} 平均浓度的 4%。这可能与高污染物浓度进水情况下 ABR 高产气量有关。有机物在 ABR 内进行水解、酸化、产氢产乙酸和产甲烷等过程的厌氧发酵,反应器可以厌氧发酵产生的气体作为动力推动内部混合物均

匀^[20-21]。在没有外部驱动力的情况下,这种循环膨胀并使污泥床流态化,有效地改善了活性生物物质和有机污染物的接触机会^[22],提高了污水和污泥之间的传质效率^[23]。污泥床流态化更加理想,污水和污泥之间的传质效率进一步提高。从 COD_{Cr} 的去除率也可以看出,ABR-AA/O 单元对 COD_{Cr} 的去除率在 93.14%~97.03%(平均为 95.00%)。

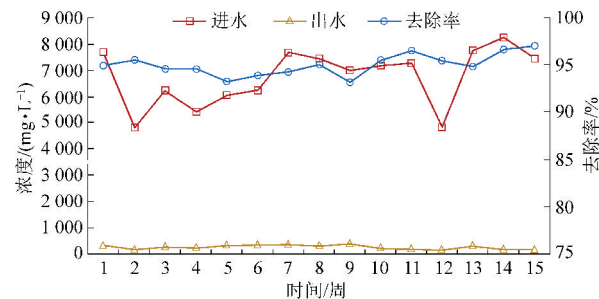


图4 ABR-AA/O 对 COD_{Cr} 的去除效果

Fig. 4 Removal effect of ABR-AA/O for COD_{Cr}

ABR-AA/O 单元对 NH₄⁺-N 的去除效果如图 5 所示。进水 NH₄⁺-N 为 164.0~306.0 mg/L(平均为 233.0 mg/L),进水 NH₄⁺-N 浓度波动均较大,但低于垃圾填埋场渗滤液,尤其是晚期渗滤液^[24-25]。出水 NH₄⁺-N 在 1.8~2.9 mg/L(平均为 2.3 mg/L),比较平稳,均在 3 mg/L 以下。ABR-AA/O 单元对 NH₄⁺-N 的去除率在 98.21%~99.34%(平均为 98.99%),较高的 NH₄⁺-N 去除率不仅与曝气有关,也可能由于 ABR 对 COD_{Cr} 的去除,使得进入好氧池的 COD_{Cr} 处在较低浓度,异养菌与氨氧化菌竞争溶解氧减弱。

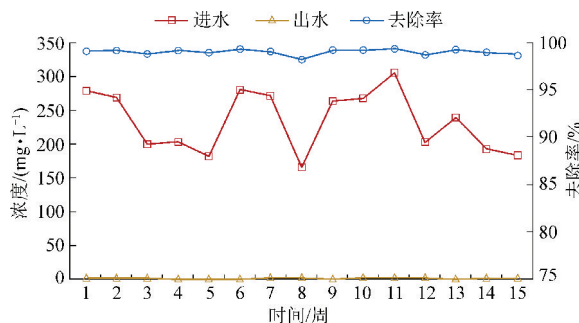


图5 ABR-AA/O 对 NH₄⁺-N 的去除效果

Fig. 5 Removal effect of ABR-AA/O for NH₄⁺-N

ABR-AA/O 单元对 TN 的去除效果如图 6 所示。进水 TN 为 252.0~384.0 mg/L(平均为 343.0 mg/L),出水 TN 为 37.0~60.1 mg/L(平均为 49.2 mg/L),TN 的去除率为 78.81%~90.03%(平均为 85.41%)。试验过程中,好氧池需要 2~4 mg/L 的

溶解氧 (Dissolved Oxygen, DO) 以确保生化反应的正常工作。由于反应器内混合物接近完全混合,硝化液回流使缺氧池的 DO 浓度大于 0.5 mg/L,达不到所要求的缺氧环境。对于反硝化过程,混合液中的 DO 会抢先与电子供体结合,从而限制了硝酸盐的还原反应^[26]。尽管如此,ABR-AA/O 对 TN 仍有 78.81%~90.03% 的去除率。分析认为,随着曝气强度的增大,好氧池的溶解氧也随之升高;硝化细菌的硝化活性提高,使 NO_3^- -N 浓度也随之增加,通过内回流提供给缺氧池的反硝化细菌,加强了反硝化作用,因此 TN 的去除率增加。

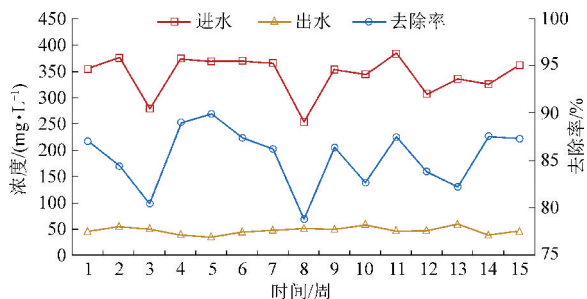


图 6 ABR-AA/O 对 TN 的去除效果

Fig. 6 Removal effect of ABR-AA/O for TN

2.3 MBR 的处理效果

MBR 是在曝气条件下,废水中污染物与微生物充分接触,促进微生物生长繁殖,有效降解污染物。为防止膜表面形成致密的污泥层而造成膜堵塞和膜污染,本试验设置了工作周期和清洗条件:运行 7 min,停运 3 min,每周或负压在 $-7 \sim -5$ kPa 时在线清洗一次,每 2 个月离线清洗一次。在线清洗采用 0.5%~1% 的 NaClO 溶液浸泡 2 h;离线清洗采用 1% 草酸 (pH 约 2) 浸泡 8~12 h,再用 0.1% 氢氧化钠 (pH 约 12) 和 0.3% NaClO 溶液浸泡 8~12 h。MBR 单元对 COD_{Cr} 的去除效果如图 7 所示。在进水 COD_{Cr} 为 214~481 mg/L (平均为 334 mg/L) 的情况下,出水 COD_{Cr} 在 134~313 mg/L (平均为 224 mg/L),出水 COD_{Cr} 比较平稳,对 COD_{Cr} 的去除率在 12.29%~42.62% (平均为 33.00%)。可生物降解的 COD_{Cr} 基本被 AA/O 去除,MBR 对于 COD_{Cr} 的去除效果有限。MBR 对 NH_4^+ -N 的去除效果如图 8 所示。在进水 NH_4^+ -N 为 1.8~2.9 mg/L (平均为 2.3 mg/L) 的情况下,出水 NH_4^+ -N 在 0.9 mg/L 以下 (平均为 0.7 mg/L),出水 NH_4^+ -N 比较平稳。MBR 反应器对 NH_4^+ -N 的去除率在 56.22%~83.35% (平均为 69.79%)。由于 MBR 的高效截留过滤作用,把大量功能微生物有效地截留在生物反应器中,保持足够高的污

泥浓度,从而降低了污泥负荷;异养菌对溶解氧的竞争减弱,有利于硝化作用的持续进行^[27-28]。MBR 出水 TN 和 SS 分别为 46.4~65.1 mg/L 和 8~14 mg/L,均满足标准要求。

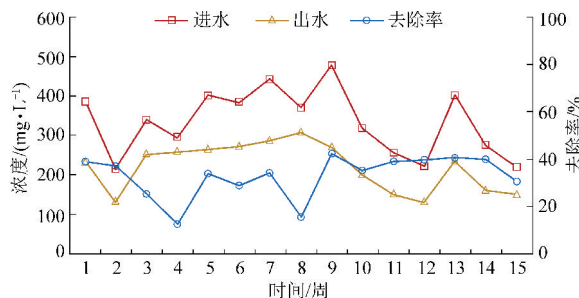


图 7 MBR 对 COD_{Cr} 的去除效果

Fig. 7 Removal effect of MBR for COD_{Cr}

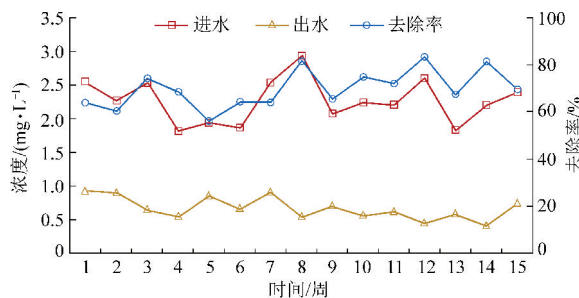


图 8 MBR 对 NH_4^+ -N 的去除效果

Fig. 8 Removal effect of MBR for NH_4^+ -N

3 结 论

(1) 混凝沉淀-气浮-ABR-AA/O-MBR 工艺对垃圾中转站渗滤液进行处理具有良好效果,出水水质达到《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)中的排放标准。

(2) 混凝沉淀-气浮作为预处理单元,保证了后续生化反应的顺利进行,出水 SS 平均为 258 mg/L,对 SS 去除率基本在 94% 以上,最高达到了 96.91%,对 COD_{Cr} 的去除率达到 50% 以上。

(3) ABR-AA/O 是有机物和氮的主要处理单元,对 COD_{Cr} 、 NH_4^+ -N 和 TN 的去除率分别在 93.14%~97.03%、98.21%~99.34% 和 78.81%~90.03%。

(4) MBR 高效截留作用使反应器内保持较高的污泥浓度,可对 ABR-AA/O 出水进行深度处理,提高出水水质。

参考文献 (References):

[1] 李高辉. 混凝气浮-厌氧-两级 AO-浸没式 MBR 工艺在垃圾中转站渗滤液处理中的应用[J]. 广东化工, 2022, 49 (12): 163-165+156.

- LI Gaothui. Application of coagulation-air-floatation-anaerobic-two-stage AO-immersion MBR process in leachate treatment of refuse transfer station [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2022, 49(12): 163-165+156.
- [2] ZHANG Yan, ZHAO Chen, REN Fangyun, et al. Treatment of compressed leachate from refuse transfer stations by freeze-melt method[J]. *Waste Management*, 2023, 164: 181-190.
- [3] 王涛,董媛媛,卜久贺,等.强化预处理+EGSB+两级AO-MBR工艺处理垃圾中转站废水的应用[J]. *环境工程*, 2023, 41(S2):25-28+33.
- WANG Tao, DONG Yuanyuan, PU Jiuhue, et al. Study on the application of enhanced pretreatment+EGSB+two-stage AO-MBR process to treat wastewater from rubbish transfer station [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(S2): 25-28+33.
- [4] SONG Z, SUN F, XING D, et al. Integrating electrochemical pre-treatment with carrier-based membrane bioreactor for efficient treatment of municipal waste transfer stations leachate[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 379: 129003.
- [5] TENG Chunying, ZHOU Kanggen, PENG Changhong, et al. Characterization and treatment of landfill leachate: A review [J]. *Water Research*, 2021, 203: 117525.
- [6] HUSSEIN I Abdel Shafy, AMR M Ibrahim, AHMED M Al Sulaiman, et al. Landfill leachate: Sources, nature, organic composition, and treatment: An environmental overview [J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2024, 15: 102293.
- [7] 闫维佳,张弛,杨志宏,等.垃圾收集运输过程中的渗滤液特征研究[J]. *山西建筑*, 2018, 44(13): 196-198.
- YAN Weijia, ZHANG Chi, YANG Zhihong, et al. Study on characteristics of leachate during garbage collection and transportation[J]. *Shanxi Architecture*, 2018, 44(13): 196-198.
- [8] JUN Zhao, LU Xueqin, LUO Jinghuan, et al. Characterization of fresh leachate from a refuse transfer station under different seasons [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, 85: 631-637.
- [9] 黄长纓.城市生活垃圾压缩中转站压滤污水的现状调查[J]. *净水技术*, 2013, 32(3): 41-45.
- HUANG Changying. Investigation on existing circumstances of leachate of pressed urban domestic solid waste in refuse transfer stations[J]. *Water Purification Technology*, 2013, 32(3): 41-45.
- [10] 叶彬.垃圾转运站渗滤液生化调节与快速处理技术中试研究[D].北京:清华大学,2011:2.
- YE Bin. Pilot study on MSW transfer station leachate treatment by bio-regulation and rapid process technology [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011: 2.
- [11] 罗伟.生活垃圾中转站渗滤液全量化处理新工艺[J]. *能源与环境*, 2022(6): 86-88.
- [12] HJ 564-2010,生活垃圾填埋场渗滤液处理工程技术规范(试行)[S].
- [13] 丁西明,马冬杰,康建邨,等.老龄化垃圾填埋场渗滤液全量化处理工程实例[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(12): 90-94.
- DING Ximing, MA Dongjie, KANG Jiancun, et al. Engineering examples of full quantitative treatment of leachate from an aging landfill [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(12): 90-94.
- [14] 高碧霄.苏州某垃圾填埋场渗滤液处理工程两级A/O+MBR工艺生化段脱氮优化研究[D].苏州:苏州科技大学,2022:2.
- GAO Bixiao. Study on the optimization of nitrogen removal in the two-stage A/O+MBR process biochemical section of a landfill leachate treatment project in Suzhou [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2022: 2.
- [15] 陈星华.混凝-PBER/PDS组合工艺处理垃圾中转站渗滤液[D].徐州:中国矿业大学,2023:2.
- CHEN Xinghua. Coagulation-PBER/PDS catalytic oxidation treatment of leachate from garbage transfer station [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023: 2.
- [16] 张立桅.油类物质对生化处理系统影响的跟踪分析[J]. *环境工程*, 1993, 11(1): 12-16.
- ZHANG Liwei. Tracking analysis of the effects of oil substances on biochemical treatment systems[J]. *Environmental Engineering*, 1993, 11(1): 12-16.
- [17] 马传净,刘海园,杨德强.浸没式MBR油脂污染离线清洗方法和经济性研究[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(16): 105-109.
- MA Chuanjing, LIU Haiyuan, YANG Deqiang. Study on off-line cleaning method and economy of grease pollution in immersed membrane bioreactor[J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(16):105-109.
- [18] GB/T 31962-2015,污水排入城镇下水道水质标准[S].
- [19] MOODY C M, TOWNSEND T G. A comparison of landfill leachates based on waste composition[J]. *Waste Management*, 2016, 63: 267-274.
- [20] QI Weikang, LIU LiFang, SHI Qi, et al. Detailed composition evolution of food waste in an intermittent self-agitation anaerobic digestion baffled reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 320(Pt A): 124342.
- [21] MENESES R, LISANDRA, ZANNERNI, et al. Current progress in anaerobic digestion reactors and parameters optimization[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022(6): 1-24.
- [22] CAMILA B D, DAVID K, ANTHONY R. CFD simulation of anaerobic granular sludge reactors: A review [J]. *Water Research*, 2023, 242: 120220.
- [23] MAO Chunlan, FENG Yongzhong, WANG Xiaojiao, et al. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 45: 540-555.
- [24] ANA I Gomes, SARA G S Santos, TãNIA F C V Silva, et al. Treatment train for mature landfill leachates: Optimization studies [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 673:470-479.
- [25] MYROSLAV Malovanyy, VOLODYMYR Zhuk, IVAN Tymchuk, et al. Optimal pre-treatment of moderately old landfill leachate at the pilot-scale treatment plant using the combined

aerobic biochemical and reagent method[J]. *Heliyon*, 2023, 9: e16695.

- [26] YUAN Z, OEHMEN A, INGILDSSEN P. Control of nitrate recirculation flow in predenitrification systems [J]. *Water Science & Technology*, 2002, 45(4) : 29–36.
- [27] FERNANDES L, SARTAJ M. Comparative study of static pile

composting using natural, forced and passive aeration methods [J]. *Compost Science and Utilization*, 1997, 5: 65–77.

- [28] NADEEM A Khan, SIMRANJEET Singh, EDUARDO Alberto López Maldonado, et al. Emerging membrane technology and hybrid treatment systems for the removal of micropollutants from wastewater[J]. *Desalination*, 2023, 565: 116873.