

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.16.020

## IOC—A/O—UF/NF/RO 组合工艺处理垃圾焚烧渗滤液

孙爱华<sup>1</sup>, 陈波<sup>2</sup>, 刘慎<sup>1</sup>

(1. 常州纺织服装职业技术学院 常州市生态纺织技术重点实验室, 江苏 常州 213164;

2. 光大常高新环保能源<常州>有限公司, 江苏 常州 213000)

**摘 要:** 常州某生活垃圾焚烧发电厂对收集的城镇居民生活垃圾发酵腐熟以提高热值,其间产生含高浓度有机物的渗滤液。渗滤液设计处理规模为 300 m<sup>3</sup>/d,采用内外循环厌氧反应器 (IOC)—A/O—UF/NF/RO 组合处理工艺,出水水质执行《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005) 中敞开式循环冷却水系统补充水水质标准。IOC 为企业自行研发的厌氧反应器,通过内、外循环系统的结合更好地适应高浓度渗滤液的处理。外置式管式 UF 与生物处理 A/O 系统组成 MBR 系统,能很好地去除有机物和总氮,MBR 出水再经 NF 和 RO 处理后,保证最后出水水质达标。运行结果表明,该工艺对 COD、NH<sub>3</sub>-N、TN 和 TP 的去除率分别为 99.99%、99.98%、99.24% 和 99.98%,出水相应指标分别为 4.6、0.24、12.4 和 0.014 mg/L,均优于敞开式循环冷却水水质标准,可作补充水再利用。

**关键词:** 渗滤液; 厌氧反应器; 超滤; 纳滤; 反渗透

**中图分类号:** TU993 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)16-0112-07

## Treatment of Leachate from Waste Incineration Plant by a Combined Process of IOC, A/O, and UF/NF/RO

SUN Ai-hua<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>2</sup>, LIU Shen<sup>1</sup>

(1. Changzhou Key Laboratory of Eco-Textile Technology, Changzhou Vocational Institute of Textile and Garment, Changzhou 213164, China; 2. Everbright Changzhou Hi-Tech Environmental Energy <Changzhou> Co. Ltd., Changzhou 213000, China)

**Abstract:** In a certain domestic waste incineration power plant in Changzhou, the collected urban domestic wastes are fermented and decomposed to improve the calorific value, during which leachate containing high concentration of organic matter is produced. The leachate was treated by a combined process of inner and outer cycling anaerobic reactor (IOC), A/O, and UF/NF/RO with designed treatment capacity of 300 m<sup>3</sup>/d, and the effluent quality follows the standard of supplementary water quality for open type circulating cooling water system in *The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Industrial Uses* (GB/T 19923-2005). The self-developed IOC can better adapt to the treatment of high concentration leachate through the combination of inner and outer circulation systems. The MBR system constituted with the external tubular UF and the biological treatment A/O system can remove organics and total nitrogen well. Then the MBR effluent is treated by nanofiltration and reverse osmosis to better ensure that the final effluent quality can better meet the standard requirements. It is found that the removal rates of COD, NH<sub>3</sub>-N, TN and TP are 99.99%, 99.98%, 99.24% and 99.98%, respectively, and the corresponding effluent values are 4.6, 0.24, 12.4 and 0.014 mg/L, respectively. These results are superior to the standard of the open type circulating cooling

water quality, thereby the effluent can be reused for supplementary.

**Key words:** leachate; anaerobic reactor; ultrafiltration; nanofiltration; reverse osmosis

填埋和焚烧是垃圾处理的常用方法,其中焚烧因节约土地、高效环保而受到关注<sup>[1]</sup>。目前我国垃圾分类收集处于推广初期,基本为混合收集,一般通过发酵腐熟以提高垃圾热值,同时产生大量渗滤液<sup>[2]</sup>。垃圾焚烧厂发酵产生的渗滤液具有成分复杂多变、水量波动大、有机污染物和氨氮浓度高、重金属离子和盐含量高等特点<sup>[3]</sup>,因此,控制和处理渗滤液有利于保护环境、生态和人体健康<sup>[4]</sup>。渗滤液在自然条件下难以自行消化降解<sup>[5]</sup>,目前渗滤液的处理方法主要有物理化学法和生物法,其中生物法处理成本较低而应用最多<sup>[6]</sup>,但仅用一种方法很

难达到排放要求,在预处理+生物处理后加上深度处理,如超滤(UF)、纳滤(NF)、反渗透(RO)等,是常用的工艺组合<sup>[7]</sup>。

1 工程概况

1.1 设计规模及水质水量确定

常州新北某垃圾焚烧厂二期渗滤液项目,设计规模为 300 m<sup>3</sup>/d,渗滤液处理系统进水水质取水水质最差时为设计数值,出水水质执行《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)中敞开式循环冷却水系统补充水水质标准。设计进水及出水水质要求见表 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

项目	pH 值	COD/ (mg · L <sup>-1</sup> )	BOD <sub>5</sub> / (mg · L <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> - N/ (mg · L <sup>-1</sup> )	TN(以 N 计)/ (mg · L <sup>-1</sup> )	TP(以 P 计)/ (mg · L <sup>-1</sup> )	SS/ (mg · L <sup>-1</sup> )
进水水质	6 ~ 9	60 000	35 000	2 300	2 500	150	15 000
出水水质	6.5 ~ 8.5	60	10	10	40	1.0	—

注: TN 参照《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)执行。

1.2 渗滤液处理流程

渗滤液产生量不仅与垃圾种类、数量有关,也与发酵腐熟等操作有关。为充分利用预处理设施,一

期、二期渗滤液经同一预处理设施——过滤器+初沉池处理后进入调节池,再由调节池分别进入一期、二期工艺处理。渗滤液处理工艺流程见图 1。

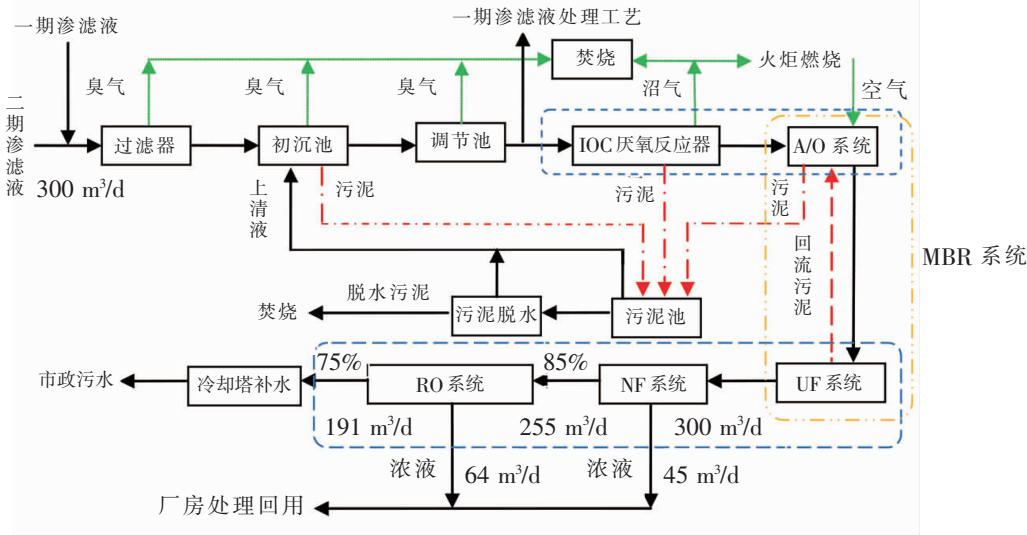


图 1 渗滤液处理流程

Fig. 1 Flow chart of leachate treatment process

2 主要处理构筑物

2.1 IOC 厌氧反应器

厌氧生物反应系统选用光大集团研发的内外循环厌氧反应器(简称 IOC 厌氧反应器),该反应器上

下各有一组反应室和三相分离器,内、外循环系统的结合适用于处理高浓度渗滤液<sup>[8]</sup>。

二期 IOC 反应器共 1 座,采用全钢结构,有效水深为 22 m,有效容积为 2 089.67 m<sup>3</sup>,停留时间为 7

d,设计容积负荷为  $7.39 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。采用中温厌氧工艺,消化反应温度控制在  $35^\circ\text{C}$ ,甲烷产气率  $0.395 \text{ m}^3/\text{kgCOD}$ ,甲烷总产气量  $6\,098 \text{ m}^3/\text{d}$ 。根据一期工程测定数据,沼气中甲烷含量约为 70%,则沼气总量为  $8\,711 \text{ m}^3/\text{d}$ ,即  $363 \text{ m}^3/\text{h}$ 。配置循环泵 2 台,  $Q=200 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=90 \text{ kPa}$ ,  $N=11 \text{ kW}$ ;渣浆泵 1 台,  $Q=20 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=140 \text{ kPa}$ ,  $N=4.0 \text{ kW}$ ;与一期工程共用火炬燃烧,处理量为  $1\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

## 2.2 A/O 系统

为满足《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)对总氮排放的要求<sup>[9]</sup>,二期设计时选择两级 A/O 系统,实际施工考虑到场地限制及一期 A/O 系统处理效果,仅在一级 A/O 系统后加了二级硝化池,进一步提高 COD 去除率。

一级反硝化池 1 座,钢筋混凝土结构,有效水深

为  $8.5 \text{ m}$ ,有效容积为  $967 \text{ m}^3$ ,停留时间为  $3.2 \text{ d}$ ,反硝化速率为  $0.07 \text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{kgMLVSS} \cdot \text{d})$ ,设计反硝化率为 50%,污泥浓度(VSS)控制在  $7\,000 \text{ mg/L}$ ,对总氮有控制要求时回流比为 30:1(无总氮控制要求时回流比控制在 9:1);一级硝化池 1 座,采用钢筋混凝土结构,有效水深为  $8.5 \text{ m}$ ,有效容积为  $1\,047.5 \text{ m}^3$ ,停留时间为  $3.5 \text{ d}$ ,污泥负荷为  $0.13 \text{ kgCOD}_5/(\text{kgVSS} \cdot \text{d})$ ,COD 去除率为 70%,VSS 控制在  $7\,000 \text{ mg/L}$ ;二级硝化池 1 座,钢筋混凝土结构,有效水深为  $8.5 \text{ m}$ ,有效容积为  $671.5 \text{ m}^3$ ,停留时间为  $2.2 \text{ d}$ ,污泥负荷为  $0.25 \text{ kgCOD}_5/(\text{kgVSS} \cdot \text{d})$ ,COD 去除率为 80%,VSS 控制在  $7\,000 \text{ mg/L}$ ,污泥产量约  $500 \text{ kg/d}$ 。一级、二级硝化池总需氧量设计值为  $1\,900 \text{ kg/d}$ ,最大空气用量为  $1\,450 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

A/O 系统主要的设备及仪表见表 2。

表 2 A/O 系统主要设备及仪表

Tab.2 Main equipment and instruments of A/O process

设备	规格	数量
一级射流泵	$Q=250 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=150 \text{ kPa}$ , $N=18.5 \text{ kW}$	2 台
二级射流泵	$Q=150 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=150 \text{ kPa}$ , $N=18.5 \text{ kW}$	2 台
消泡泵(卧式离心泵)	$Q=100 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=150 \text{ kPa}$ , $N=11 \text{ kW}$	1 台
冷水泵(卧式离心泵)	$Q=300 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=150 \text{ kPa}$ , $N=18.5 \text{ kW}$	1 台
换热泵(卧式离心泵)	$Q=300 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=150 \text{ kPa}$ , $N=15 \text{ kW}$	1 台
换热器	$A=250 \text{ m}^2$	1 台
一级硝化液回流泵	$Q=100 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=150 \text{ kPa}$ , $N=7.5 \text{ kW}$	1 台
A 池潜水搅拌机	$N=5 \text{ kW}$	2 台
一级 O 池潜水搅拌机	$N=2.5 \text{ kW}$	1 台
二级 O 池潜水搅拌机	$N=2.5 \text{ kW}$	1 台
罗茨鼓风机	$Q=25 \text{ m}^3/\text{min}$ , $H=70 \text{ kPa}$ , $N=35 \text{ kW}$ (2 用 1 备)	3 台
一级射流曝气器	8 路曝气器	4 套
二级射流曝气器	10 路曝气器	2 套

## 2.3 UF 系统

外置式管式 UF 与生物处理 A/O 系统组成 MBR 系统(膜生物反应器),其中 A/O 系统去除有机物和总氮,UF 去除大部分颗粒和胶体<sup>[10]</sup>。

UF 膜装置 2 套,膜为 PVDF 材质,外壳为 FRP 材质,组件直径和长度分别为  $20.32 \text{ cm}$ (8 in)、 $3 \text{ m}$ ,膜管直径为  $8 \text{ mm}$ ,膜面积为  $27.2 \text{ m}^2$ ,膜面流速为  $4 \text{ m/s}$ ,设计膜通量为  $67.4 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,进水量为  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

## 2.4 NF 系统

NF 选用卷式有机复合膜,作为 RO 系统的预处理,去除前段工艺未能去除的 COD 和二价盐类物质,确保进入 RO 系统的水质符合进水水质要求。

NF 装置 1 套,膜面积为  $37.2 \text{ m}^2$ ,设计膜通量为  $10.65 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,回收率为 85%,进水量为  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ (按超负荷 110% 运行)。

## 2.5 RO 系统

采用卷式膜,系统运行时,若原水 C/N 值不能满足去除总氮要求,又无外加碳源时,通过 RO 系统可保证出水 TN、COD、氯离子等指标达到要求,实际运行时,用 RO 膜承担过多任务是不经济的。

RO 装置 1 套,组件直径和长度分别为  $17.78 \text{ cm}$ (7 in)、 $1\,016 \text{ mm}$ ,单支膜组件面积为  $37.2 \text{ m}^2$ ,每支膜壳串联膜组件 6 支,设计进水流量为  $12 \text{ m}^3/\text{h}$ ,运行压力为  $3 \text{ MPa}$ ,清液产量为  $193.75 \text{ m}^3/\text{d}$ ,回收率为 75%,标称脱盐率为 99.7%。

### 3 工艺运行效果

现对二期工程自2018年6月试运行起一年半的运行数据进行统计,以判断渗滤液的产生特点和处理工艺情况,排除因调试等影响,部分时期无监测数据的情况,以各测定指标周平均值为研究对象。对于出水pH值、BOD<sub>5</sub>和SS指标,在RO膜出水时,pH值为6.6~7.0、BOD<sub>5</sub>在0.9 mg/L以内、SS为0 mg/L,均优于各自出水要求。

#### 3.1 对COD的去除

垃圾焚烧厂发酵产生的渗滤液经调节池混合后,其COD主要集中在45 000 mg/L附近,波动取决于降水、温度、季节性消费改变等因素。一般认为,厌氧反应器在中温条件下对高浓度COD的去除率可达95.0%<sup>[11]</sup>,外置式MBR+NF+RO膜系统对COD去除率达93.3%<sup>[12]</sup>。本项目运行期间调节池COD和各主要单元COD去除率见图2,进水COD为35 000~64 000 mg/L,平均值为49 449 mg/L,总去除率为99.99%,出水COD为2~8 mg/L,平均值为4.6 mg/L,明显优于出水要求(60 mg/L),表明处理工艺对COD波动适应性强,耐冲击负荷,出水水质稳定,处理效果好。

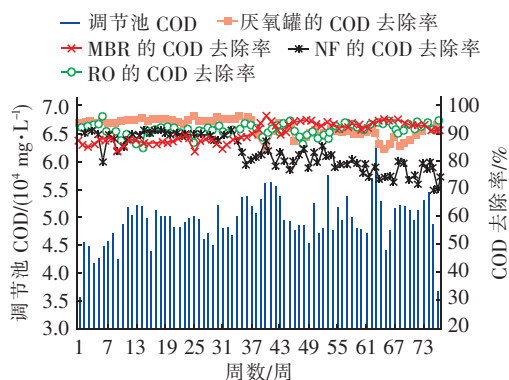


图2 渗滤液进水COD及各主要单元COD去除率

Fig. 2 COD of leachate influent and COD removal rates of the main units

从图2可以看出,RO对应的波动性最小,厌氧罐与NF对应的波动性中等,MBR系统对应的波动性最大。厌氧过程的影响因素主要有温度、pH值、氧化还原电位、营养比、有毒有害物质等,渗滤液进水水质、水量虽具有一定波动性,但经预处理进入调节池后,短期具有稳定性,主要影响因素为温度,通过比对波动较大位置发现,该处外界温度超出30~35℃的最佳范围,特别是外界温度<15℃时,对渗

滤液进水温度影响较大,不利于厌氧发酵过程。IOC厌氧反应器所处理渗滤液COD较高,去除率最高为95.6%,平均去除率为92.1%,在去除率波动而不利时,出水COD值较高,增加了后续A/O系统的处理压力。MBR系统平均去除率为90.3%,有机物的去除主要在A/O部分完成,特别是系统运行半年后,去除率趋于稳定。RO对进水要求较高,一般进水COD不超过50 mg/L为宜,NF出水COD均值为56.1 mg/L,基本符合RO膜进水水质要求,因此,其去除率波动性较小。

#### 3.2 对NH<sub>3</sub>-N的去除

生物脱氮过程主要通过硝化和反硝化作用实现,单一厌氧条件下的生物过程难以完成反硝化脱氮过程<sup>[13]</sup>。采用两级UASB-A/O系统处理渗滤液,NH<sub>3</sub>-N为1 100~2 000 mg/L时的去除率为99.0%,TN去除率为80%~92%<sup>[14]</sup>。采用A/O工艺联合MBR对渗滤液NH<sub>3</sub>-N和TP的去除率可达99.2%和92.2%<sup>[15]</sup>。运行期间调节池NH<sub>3</sub>-N和各主要单元去除率见图3,进水NH<sub>3</sub>-N为800~2 400 mg/L,平均值为1 528.5 mg/L,总去除率为99.98%,出水NH<sub>3</sub>-N为0.001~0.850 mg/L,平均值为0.24 mg/L,明显优于出水NH<sub>3</sub>-N要求的10 mg/L。

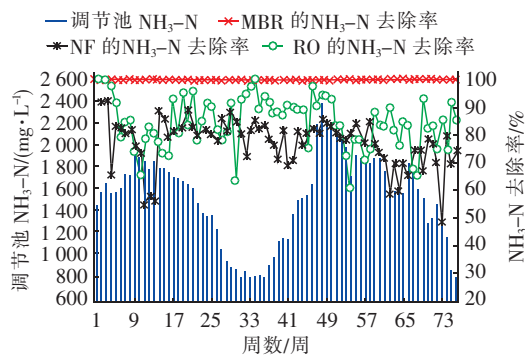


图3 渗滤液进水NH<sub>3</sub>-N及各主要单元氨氮去除率

Fig. 3 NH<sub>3</sub>-N of leachate influent and NH<sub>3</sub>-N removal rates of the main units

由图3可以看出,调节池中NH<sub>3</sub>-N随季节性波动明显,温度高时NH<sub>3</sub>-N值也高。MBR系统出水NH<sub>3</sub>-N绝对值存在波动,但其去除率稳定,通过系统中大量繁殖的硝化菌和反硝化菌完成氮的去除,去除率为99.3%~99.8%,出水NH<sub>3</sub>-N为3.3~10.9 mg/L,均值为6.6 mg/L。NF和RO的氨氮去除率分别为77.2%和84.4%,主要通过截留颗



粒状有机物过程完成氮的去除,与有机物状态、孔径有关,波动较大。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 以游离氨(FA,  $\text{NH}_3$ )和铵根离子( $\text{NH}_4^+$ )两种形式存在于水中,FA浓度与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度、pH值和温度呈正相关,脱氮过程高浓度FA会强烈抑制硝化和反硝化过程<sup>[16]</sup>, $\text{NH}_3\text{-N}$ 主要通过MBR系统中的A/O部分完成去除,UF部分 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率不高,MBR系统出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 绝对值有波动,虽然NF、RO的出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 值相对稳定,但其去除率波动较大。

对调节池和IOC厌氧反应器中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN值比对发现,调节池中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN平均值分别为1 528.5、1 738.5 mg/L,而IOC厌氧反应器中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN均值分别为1 824.1、1 971.8 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN分别升高19.34%和13.42%,主要是嗜温菌分泌的蛋白水解酶能在厌氧条件下将复杂有机物水解生成氨基酸所致<sup>[17]</sup>。

### 3.3 对TN的去除

氮的转化去除包括氨化、硝化和反硝化,IOC厌氧反应器中无硝化后的回流液,因此,TN的去除主要在A/O系统完成。本项目运行期间调节池TN值和各主要单元的TN去除率见图4,进水TN为990~3 100 mg/L,平均值为1 738.5 mg/L,总去除率为99.24%,出水TN为9.5~15 mg/L,平均值为12.4 mg/L,明显优于出水要求的40 mg/L。

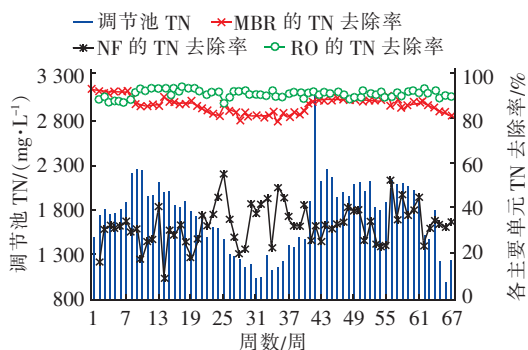


图4 渗滤液进水TN值及各主要单元TN去除率

Fig. 4 TN of leachate influent and TN removal rates of the main units

由图4可以看出,调节池中TN浓度随季节性而波动。MBR系统对TN的去除率出现一定波动,但比 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率低,TN去除率为79.3%~94.0%,出水TN为90.1~367 mg/L,均值为243.3 mg/L。反硝化过程需要DO为0.2~0.5 mg/L的缺氧环境,硝化后的回流废水能保证DO在2.0 mg/L

以上,但经IOC厌氧反应器处理后进入A/O段的废水COD均值为3 937 mg/L,两者混合后,DO递减较快,缺氧池后段处于厌氧状态,反硝化反应受阻<sup>[18]</sup>。NF和RO的TN去除率分别为33.2%和92.1%,与有机物状态、孔径有关。

### 3.4 对TP的去除

磷的去除主要有化学除磷和生物除磷,本项目为生物除磷,主要在两个阶段完成磷的去除,一是IOC厌氧反应阶段微生物完成自身生长吸收磷;另一个是A/O阶段中厌氧、好氧微生物完成自身生长吸收磷和好氧段聚磷菌超量吸收磷。运行期间调节池TP值和各主要单元TP去除率见图5,进水TP为48~182 mg/L,平均值为97.2 mg/L,总去除率为99.98%,出水TP为0.001~0.036 mg/L,平均值为0.014 mg/L,明显优于出水要求的1.0 mg/L。

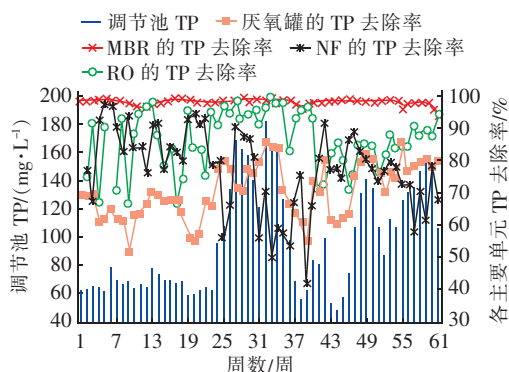


图5 渗滤液进水TP值及各主要单元TP去除率

Fig. 5 TP of leachate influent and TP removal rates of the main units

由图5可以看出,调节池中TP浓度随季节性波动明显,且与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN的波动相反。垃圾渗滤液中一般磷元素缺乏,好氧微生物所需C:P为100:1,厌氧兼性微生物所需C:P为200:1,而本项目 $\text{BOD}_5/\text{TP}$ 为292,磷元素相对缺乏,当垃圾焚烧前进行发酵腐熟时,氮元素越多,所需磷元素越多,剩余的就越少,反之则相反<sup>[19]</sup>。MBR、NF、RO的TP去除率分别为97.9%、77.4%和86.4%,与磷为溶解性磷酸盐等状态有关。

### 4 运行成本分析

二期垃圾处理和渗滤液处理项目总投资为37 500万元,垃圾焚烧厂渗滤液实际运行成本为28.08元/ $\text{m}^3$ ,其中电费19.23元/ $\text{m}^3$ ,药剂费4.20元/ $\text{m}^3$ ,维修费1.81元/ $\text{m}^3$ (含采购备品备件费),人

工费 2.84 元/ $\text{m}^3$  (一期、二期均摊)。渗滤液处理成本以电费为主,电耗为  $33.43 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

## 5 结语

工程实践表明,采用 IOC—A/O—UF/NF/RO 组合工艺处理垃圾焚烧厂渗滤液,出水水质满足《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005),达到补充水再利用要求。该工艺对水质、水量波动较大的渗滤液具有较强的适应性,有机物和总氮主要在 MBR 系统中去除,出水再经 NF 和 RO 处理后,COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN 和 TP 分别达到 4.6、0.24、12.4 和  $0.014 \text{ mg/L}$ 。该工艺结合了生化处理系统和膜处理系统,渗滤液处理成本为 28.08 元/ $\text{m}^3$ 。

## 参考文献:

- [1] 陈燕,任洪艳,阮文权. 厌氧—好氧工艺处理垃圾焚烧厂渗滤液工程运行效果[J]. 环境工程学报,2015,9(12):5750—5756.  
CHEN Yan, REN Hongyan, RUAN Wenquan. Project operation effect of anaerobic-aerobic process for leachate treatment of garbage incineration plant [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9 (12): 5750—5756 (in Chinese).
- [2] 郭智,刘杰,邱明建,等. 组合工艺深度处理垃圾焚烧发电厂渗滤液尾水[J]. 工业水处理,2019,39(5):29—33.  
GUO Zhi, LIU Jie, QIU Mingjian, et al. Research on the combined process of the advanced treatment of leachate tail water from a waste incineration power plant [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39 (5): 29—33 (in Chinese).
- [3] 班福忱,韩雪,姜亚玲. 生活垃圾焚烧厂垃圾渗滤液处理工程实例[J]. 水处理技术,2015,41(9):133—136.  
BAN Fuchen, HAN Xue, JIANG Yaling. Landfill leachate treatment project in solid waste incineration plant [J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41 (9):133—136 (in Chinese).
- [4] 孙娜,王艳芳,王志鹏,等. NF/RO 在垃圾焚烧厂渗滤液处理工程中的应用[J]. 中国给水排水,2015,31(20):104—107.  
SUN Na, WANG Yanfang, WANG Zhipeng, et al. Application of NF/RO process to leachate treatment in waste incineration plant [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31 (20):104—107 (in Chinese).
- [5] 许国芹,尹芳,张无敌,等. 城市垃圾渗滤液厌氧消化试验研究[J]. 中国沼气,2017,35(5):20—24.  
XU Guoqin, YIN Fang, ZHANG Wudi, et al. An experiment on anaerobic digestion of municipal landfill leachate [J]. China Biogas, 2017, 35 (5): 20—24 (in Chinese).
- [6] 黄奕亮,张立秋,李淑更,等. 短程硝化厌氧氨氧化联合处理实际垃圾渗滤液[J]. 工业水处理,2018,38(3):37—41.  
HUANG Yiliang, ZHANG Liqu, LI Shugeng, et al. Combined treatment of landfill leachate by short-cut nitrification and anaerobic ammonium oxidation [J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38 (3): 37—41 (in Chinese).
- [7] 魏桃员,陈玉婷,肖扬帆,等. TMBR + NF/RO 组合工艺处理垃圾渗滤液的工程应用[J]. 工业安全与环保,2016,42(5):34—37,51.  
WEI Taoyuan, CHEN Yuting, XIAO Yangfan, et al. Application of TMBR and NF/RO combined technology in landfill leachate treatment [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2016, 42 (5): 34—37, 51 (in Chinese).
- [8] 陆红,高用贵,高兴斋,等. IOC 厌氧反应器的结构介绍及设计计算的探讨[J]. 中国沼气,2016,34(4):45—50.  
LU Hong, GAO Yonggui, GAO Xingzhai, et al. Discussion on structure and design calculation of IOC anaerobic reactor [J]. China Biogas, 2016, 34 (4): 45—50 (in Chinese).
- [9] 王凯,王淑莹,朱如龙,等. 短程硝化联合厌氧氨氧化处理垃圾渗滤液的启动[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(5):2136—2143.  
WANG Kai, WANG Shuying, ZHU Rulong, et al. Start-up of short-term nitrification/ANAMMOX process for treatment of landfill leachate [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44 (5): 2136—2143 (in Chinese).
- [10] 施军营,王玉晓,王强,等. MBR + NF/RO 工艺在垃圾渗滤液处理工程中的应用[J]. 水处理技术,2014,40(11):129—131,135.  
SHI Junying, WANG Yuxiao, WANG Qiang, et al. Application of MBR + NF/RO process in landfill leachate treatment engineering [J]. Technology of Water Treatment, 2014, 40 (11): 129—131, 135 (in Chinese).
- [11] 徐竺,李正山,杨玖贤. 上流式厌氧过滤器处理垃圾

- 渗滤液的研究[J]. 中国沼气, 2002, 20(2): 12-15.
- XU Zhu, LI Zhengshan, YANG Jiuxian. Study of landfill leachate treatment with up-flow anaerobic filter [J]. China Biogas, 2002, 20(2): 12-15 (in Chinese).
- [12] 蔡斌. 某市垃圾渗滤液处理工程的脱氮研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
- CAI Bin. Study on Biological Nitrogen Removal of Municipal Garbage Landfill Leachate [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017 (in Chinese).
- [13] 程五良, 陈煜南, 李晓雁, 等. UASB反应器处理垃圾渗滤液的启动和运行效果研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(23): 10-12, 16.
- CHENG Wuliang, CHEN Yunan, LI Xiaoyan, *et al.* Start up and operation of up flow anaerobic sludge blanket for land fill leachate treatment [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(23): 10-12, 16 (in Chinese).
- [14] 张树军, 彭永臻, 曾薇, 等. 高氮城市生活垃圾渗滤液短程生物脱氮[J]. 环境科学学报, 2006, 26(5): 751-756.
- ZHANG Shujun, PENG Yongzhen, ZENG Wei, *et al.* Nitrogen removal from high nitrogen municipal landfill leachate via nitrification and denitrification [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(5): 751-756 (in Chinese).
- [15] 胡君杰, 夏俊方, 方小琴, 等. 垃圾渗滤液短程硝化反硝化脱氮工艺的研究[J]. 工业水处理, 2016, 36(5): 51-54.
- HU Junjie, XIA Junfang, FANG Xiaoqin, *et al.* Research on the shortcut nitrification denitrification nitrogen removing process for landfill leachate [J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(5): 51-54 (in Chinese).
- [16] 姜婷婷, 李昱含, 谢雨阳, 等. 游离氨对污水生物脱氮的影响综述[J]. 应用化工, 2020, 49(9): 2308-2312, 2318.
- JIANG Tingting, LI Yuhan, XIE Yuyang, *et al.* Review of the effect of free ammonia on biological nitrogen removal in wastewater [J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(9): 2308-2312, 2318 (in Chinese).
- [17] 李靖. UASB-A/O-UF工艺处理垃圾焚烧发电厂渗滤液[J]. 中国给水排水, 2014, 30(12): 20-24.
- LI Jing. UASB-A/O-UF process for treatment of leachate from domestic waste incineration power plant [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(12): 20-24 (in Chinese).
- [18] 谢柏希, 曾思春. 某城镇污水厂A<sup>2</sup>/O工艺氨氮去除率高而总氮去除率低的探讨[J]. 资源节约与环保, 2015(5): 34-35.
- XIE Boxi, ZENG Sichun. Discussion on A<sup>2</sup>/O process for high removal of ammonia nitrogen and low removal of total nitrogen in a municipal sewage treatment plant [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2015(5): 34-35 (in Chinese).
- [19] 王传英. 城市生活垃圾填埋场渗滤液回灌处理技术实验研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- WANG Chuanying. Study on the Urban Domestic Refuse Treatment by Leachate Recirculation Process [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011 (in Chinese).

作者简介: 孙爱华(1977-), 男, 江苏泰州人, 硕士, 讲师, 工程师, 主要从事水处理等方面的研究。

E-mail: sunzhang1023@163.com

收稿日期: 2020-08-20

修回日期: 2020-09-11

(编辑: 衣春敏)

为了幸福家园, 请节约身边水资源