

# EGSB串联AAO-AO处理餐厨垃圾废液的研究

曾兆宇, 胡友彪

安徽理工大学, 地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2023年3月20日; 录用日期: 2023年4月18日; 发布日期: 2023年4月25日

## 摘要

餐厨垃圾废液是餐厨垃圾处理中最重要且复杂的环节。餐厨垃圾废液包含大量油脂、淀粉类有机物, 并具有高COD、SS、氨氮、富营养化潜势等特点。选取的EGSB串联A<sup>2</sup>O-AO工艺, 具有操作简单, 占地面积小, 投入成本低, 减少二次污染。EGSB反应器在常温下对餐厨垃圾废液的COD去除率在80%~90%, 对SS的去除率在62%~75%。AAO-AO一体化设备对进水废液COD的去除率在89.75%~93.13之间, 对进水废液NH<sub>3</sub>-N的去除率在92.51%~97.34%之间, 对进水废液TN的去除率在91.42%~97.75%之间, 对进水废液TP的去除率在87.50%~98.25%之间。最终出水满足《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962-2015)。

## 关键词

餐厨垃圾渗滤液, EGSB, A<sup>2</sup>O-AO

# Study on EGSB Series AAO-AO Treatment of Kitchen Garbage Waste Liquid

Zhaoyu Zeng, Youbiao Hu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Mar. 20<sup>th</sup>, 2023; accepted: Apr. 18<sup>th</sup>, 2023; published: Apr. 25<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Kitchen waste water is the most important and complex part of food waste disposal. The kitchen waste water contains a large amount of fat, starch organic matter, and has the characteristics of high COD, SS, ammonia nitrogen and eutrophication potential. The selected EGSB tandem A<sup>2</sup>O-AO process has simple operation, small footprint, low input cost and reduced secondary pollution. The COD removal rate of kitchen waste water reached 80%~90% and 62%~75% of SS in EGSB reactor at room temperature. The removal rate of COD of influent waste water was between 89.75% and 93.13%,

the removal rate of  $\text{NH}_3\text{-N}$  of influent waste water was between 92.51% and 97.34%, the removal rate of influent waste water TN was between 91.42% and 97.75%, and the removal rate of influent waste water TP was between 87.50% and 98.25%. All of these indicators could meet "Wastewater Quality Standards for Discharge to Municipal Sewers" (GB/T 31962-2015).

## Keywords

Kitchen Waste Leachate, EGSB, A<sup>2</sup>O-AO

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 工程背景及概述

### 1.1. 设计背景

随着时代的发展, 国家的倡导, 人类环保意识也越来越高[1], 近年来伴随着生活水平的提高, 餐饮行业愈发繁荣, 随之带来的餐厨垃圾也逐年扩增。餐厨垃圾因其成分复杂, 目前的处理模式还是比较单一, 甚至处理工艺依旧难以突破。垃圾只是放错地方的资源[2], 也同样适用于餐厨垃圾, 对于餐厨垃圾的可遵循:

(一) 有利于发展循环经济, 推动建设资源节约型和环境友好型社会, 餐厨垃圾也是一种不合理的资源, 有机物质含量高。

(二) 切实保障食品安全和人的健康, 通过对餐厨垃圾进行无害化处理, 可以有效地减少地沟油的产生[3], 有效防止有害物质从源头进入市场, 为保证食品安全奠定基础。

(三) 餐厨垃圾集中处理设施作为生活垃圾的一部分, 其直接影响城市形象。建设现代化的餐厨垃圾收集、运输和处理工程, 对于改善城市的居住环境、功能和面貌, 具有重要意义。

(四) 建设餐厨垃圾处理厂, 既可以有效地节约土地资源, 消除对环境的二次污染, 保护市政设施和周围的水体, 又可以消除餐厨垃圾乱倾倒、乱收购的现象。

### 1.2. 设计规模

合肥市长丰县某小型餐厨垃圾处理中心, 属于试运行项目, 占地约 120 m<sup>2</sup>, 设计日处理餐厨垃圾废液 5 t。前期处理餐厨垃圾量较少, 后期将逐渐扩大规模, 能为未来餐厨垃圾小型化处理提供参考研究价值。

### 1.3. 餐厨垃圾废液来源及主要特性

Table 1. The basic characteristics of kitchen waste

表 1. 餐厨垃圾主要特征

组分	TS	VS (%TS)	C/N	含水率	盐度	含油率
含量	14%	87%	17.73	82.47%	0.312%	3%

收集的餐厨垃圾主要来源于周围几个居民区, 每个居民区均实行垃圾分类制度, 并配有垃圾分导专员协助居民进行垃圾分类。餐厨垃圾通过餐厨垃圾运输车直接运送到餐厨垃圾处理站。

从居民区收集的餐厨垃圾成分复杂, 多为菜叶[4], 剩饭, 碎肉屑, 果皮, 骨头[5]等。不同地区因饮食习惯差异, 所产生的餐厨垃圾也有较大差异。根据在合肥市长丰县所在区域, 对餐厨垃圾的主要特性进行测定, 所得结果见表 1。

该小型餐厨垃圾处理厂所产生的餐厨垃圾废液来源主要分为三种, 见表 2。

**Table 2.** Main composition of kitchen waste leachate

**表 2.** 餐厨垃圾废液主要来源

废液来源	废液量(m <sup>3</sup> /d)	主要污染物
餐厨垃圾渗滤液	4	COD, BOD <sub>5</sub> , pH, SS, TN, TP, NH <sub>3</sub> -N, 动植物油
餐厨垃圾冲洗用水	0.5	
臭气洗涤塔废液	0.5	pH

#### 1.4. 设计目标及参数

餐厨垃圾渗滤液处理系统的进、出水设计指标见表 3。

**Table 3.** Design influent and effluent indices of food waste leachate treatment system

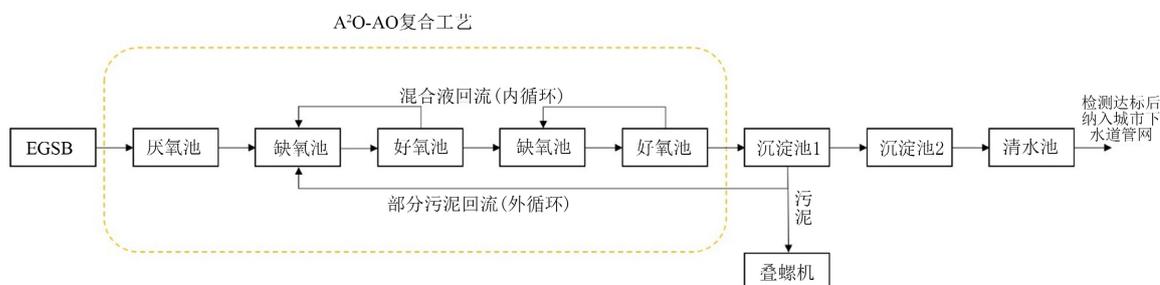
**表 3.** 餐厨垃圾渗滤液设计进、出水指标

项目	COD	BOD <sub>5</sub>	TN	TP	NH <sub>3</sub> -N	SS
进水(mg/L)	20,000	8000	2000	400	2000	3000
出水(mg/L)	500	300	70	8	45	400

## 2. 工艺流程与设计参数

从表 1 中可知, 餐厨垃圾的总固体含量(TS)平均为 14%, 再经由压滤冲洗后, 最终产生的废液 TS 约为 7%, 属于低固化状态[6], 再结合本项目的实际需求, 即处理废液量少, 产生的少量气体无需回收的特点, 选取 EGSB 反应器用于预处理后废液的厌氧消化。由表 3 可知:  $COD/TN = 10 > 8$ ,  $TP/BOD_5 = 0.05 < 0.06$ , 可选取 A<sup>2</sup>O 工艺, 它具有建设、运营成本低, 处理负荷量大的优点。针对餐厨垃圾渗滤液污染物难度高的特点, 为保证生化系统不受破坏, 在 A<sup>2</sup>O 基础上串联 AO 形成 A<sup>2</sup>O-AO。最终采取 EGSB/A<sup>2</sup>O-AO 复合工艺处理餐厨垃圾渗滤液。

### 综合工艺及设备的选取



**Figure 1.** Process of biological treatment for food waste leachate

**图 1.** 餐厨垃圾渗滤液的生物处理工艺

本项目餐厨垃圾废液的处理包括 EGSB, A<sup>2</sup>O-AO 一体化设备, 具体工艺见图 1。

所需设备见表 4。

**Table 4.** Main equipment and parameters of kitchen waste leachate disposal process  
**表 4.** 餐厨垃圾压滤液处理工艺的主要设备及参数

主要设备	规格型号	数量	备注
EGSB 反应器	$\varphi 2 \times 7 \text{ m}$	1	碳钢防腐
AAO-AO 一体化设备	$8 \times 2 \times 3 \text{ m}$	1	碳钢防腐
曝气风机	SR50-0.75	1	
污水提升泵	WQ1.5-15-0.37	4	
污泥回流泵	WQ1.5-15-0.37	1	
混合液回流泵	WQ1.5-15-0.37	1	

### 3. 餐厨垃圾废液的处理

#### 3.1. EGSB 反应器选取与启动

EGSB 具有较高的高径比和占地面积小[7], 是在传统 UASB 反应器基础上开发的第三代高效厌氧反应器, 除兼具 UASB 反应器的优点外还具有抗冲击负荷能力强, 高水力负荷和高产气负荷, 厌氧反应速率快, 运行稳定等优点[8]。EGSB 反应器是在 UASB 反应器基础上研制的第三代高效厌氧反应器。除了 EGSB 采用较高的液体表面流速和回流之外, EGSB 反应器在结构形式、污泥形态等方面与 UASB 反应器非常相似。UASB 反应器是目前运用最广泛的厌氧反应器, 其工艺条件及技术参数相对 EGSB 反应器来说更趋成熟[9], 因此, 本实验中 EGSB 反应器的启动运行可以参考 UASB 反应器的启动及运行。厌氧废水处理过程是由微生物完成的, 细胞的生长和维持需要一定数量的养分, 但有些养分过量会抑制厌氧系统的启动。一般而言, 营养比约为  $C:N:P = 75:5:1$ , 如以 C 为 COD 的化学计量关系推算, 则  $COD:N:P = 200:5:1$ 。在厌氧生物处理中, 除了 C、N、P 等营养物是微生物细胞合成所必需的外, 某些无机盐类虽然在微生物细胞体内存在甚微, 但对维持微生物的生长、繁殖及反应器中微生物培养阶段的稳定运行都极为重要。

本项目中 EGSB 反应器尺寸为  $\varphi 2 \times 7 \text{ m}$ , 采用碳钢防腐, 处于常温下运行。废液、污泥和剩余有机物通过污水泵注入 EGSB 底部布水器, 在生成气体和上升水流的带动下继续升流, 废液、废气、污泥在 EGSB 顶部三相分离器作用下实现分离。塔外配有循环泵, 连接 EGSB 上层和底层, 部分废液从上至下通过循环泵, 实现外循环。既能降低进水浓度, 也能加速水流上升速度, 使 EGSB 内颗粒污泥膨胀效果更好。

(一) EGSB 反应器的启动: EGSB 反应器是否能有效稳定运行, 很大程度取决于其内部的污泥性能。污泥最好能达到颗粒状, 说明内部的厌氧菌群活跃且有效[10]。污泥的接种来自合肥市一家污水处理厂, 通过专业运输车辆拉入项目现场。在接种好污泥后, 需等待一段时间至 EGSB 反应器内部系统趋于稳定后进行 EGSB 的调试。

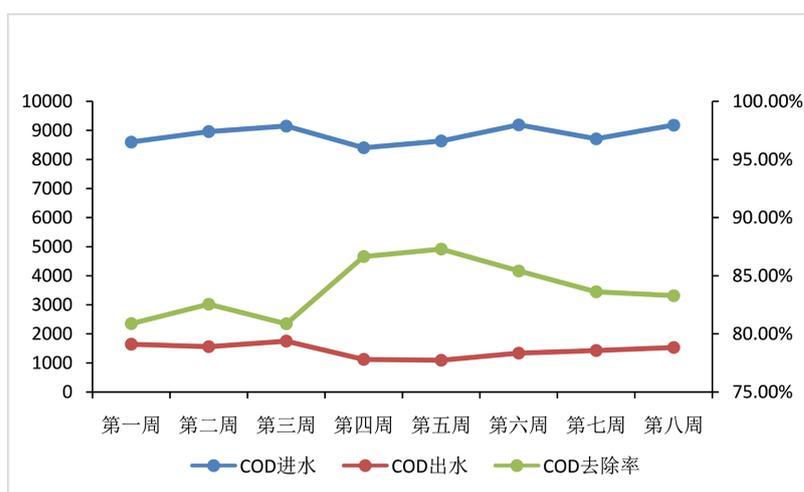
(二) EGSB 反应器的调试: 对于 EGSB 的调试主要考察其 COD、SS、pH 的去除效果。每隔一周检测其进水口和出水口的 COD、SS、pH 等各项参数。

#### 3.2. EGSB 反应器对餐厨垃圾废液的处理效果

本项目检测了自 2022 年 2 月 17 日至 5 月 26 日各项污染物经 EGSB 餐厨垃圾废液的数据如表 5。

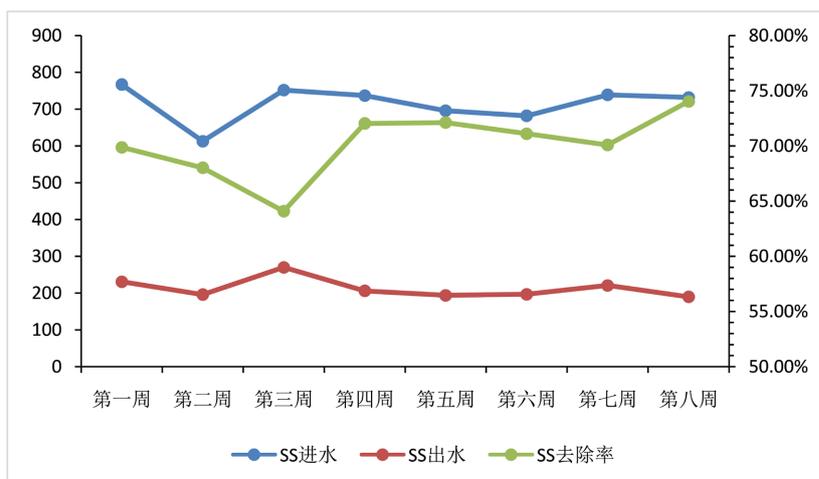
**Table 5.** From February 17 to May 26, 2022, various pollutants were monitored by EGSB kitchen waste leachate data sheet  
**表 5.** 2022 年 2 月 17 日至 5 月 26 日各项污染物经 EGSB 餐厨垃圾渗滤液监测数据表

项目	第一周	第二周	第三周	第四周	第五周	第六周	第七周	第八周
COD 进水 (mg/L)	8602	8960	9152	8406	8636	9195	8713	9185
COD 出水 (mg/L)	1645	1563	1751	1122	1096	1341	1427	1535
SS 进水 (mg/L)	767	613	752	737	696	682	739	732
SS 出水 (mg/L)	231	196	270	206	194	197	221	190
pH 进水	7.4	7.0	7.6	7.2	7.2	7.4	6.9	6.8
pH 出水	6.5	6.7	6.7	6.3	6.1	6.3	6.4	6.2



**Figure 2.** COD concentration and removal rate of EGSB reactor influent and effluent  
**图 2.** EGSB 反应器进水、出水 COD 浓度及去除率

由图 2, 图 3 可看出, EGSB 反应器在常温下接种城市污水处理厂污泥后能正常启动运行, 对于 COD, SS 的去除有十分优秀且稳定的效果, 其中 EGSB 反应器在常温下对餐厨垃圾废液的 COD 去除率在 80%~90%, 对 SS 的去除率在 62%~75%。



**Figure 3.** SS concentration and removal rate of EGSB reactor influent and effluent  
**图 3.** EGSB 反应器进水、出水 SS 浓度及去除率

EGSB 反应器内 pH 的变化: 由表 5 可知, 餐厨垃圾废液由调节池经污水提升泵导入 EGSB 反应器后, pH 值会有一个降低的过程, 这是因为 EGSB 反应器内产乙酸菌的繁殖和有机酸的积累导致。日常检测中需要及时掌握 EGSB 反应器内 pH 值得变化, EGSB 反应器内水解菌和产酸菌对 pH 值有较大的适应范围, 大多数这类细菌可在 pH 值为 5.0 至 8.5 范围内生长良好, 但产甲烷菌对 pH 值较为敏感, 适宜的生长 pH 环境在 6.5 至 7.8 范围内[11]。所以对 EGSB 反应器内 pH 值的控制应该在此范围内, 保证其正常生长繁殖。为保证 EGSB 反应器内 pH 值保持稳定状态, 可向其内添加  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{NaOH}$  等。

### 3.3. AAO-AO 一体化设备选取与启动

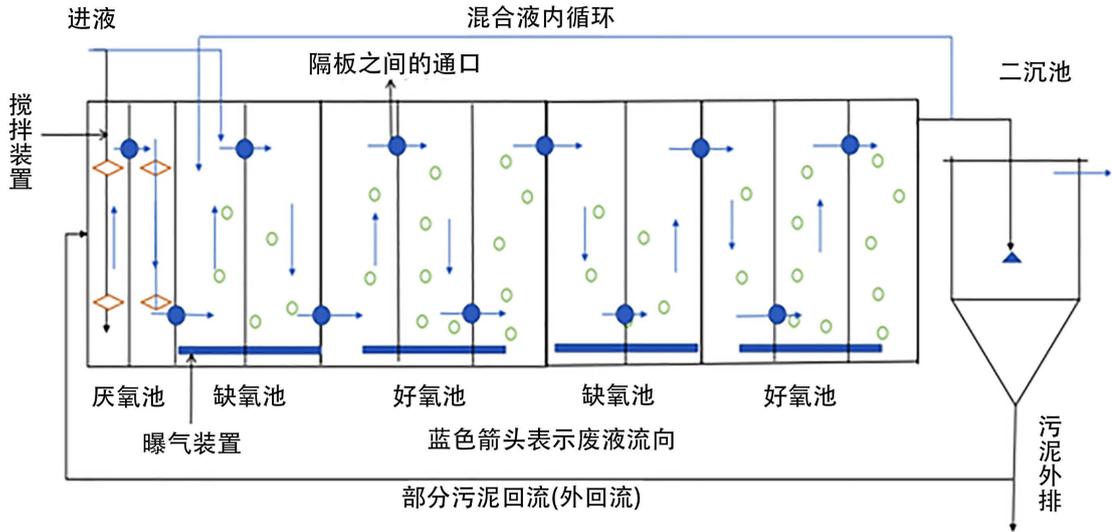


Figure 4. Schematic diagram of AAO-AO structure  
图 4. AAO-AO 结构示意图

Table 6. Various pollutants were monitored by AAO-AO kitchen waste leachate data sheet from February 17 to May 26, 2022  
表 6. 2022 年 2 月 17 日至 5 月 26 日各项污染物经 AAO-AO 餐厨垃圾渗滤液监测数据表

项目	第一周	第二周	第三周	第四周	第五周	第六周	第七周	第八周
COD 进水 (mg/L)	1645	1563	1751	1122	1096	1341	1427	1535
COD 出水 (mg/L)	133	108	128	115	102	127	98	139
BOD <sub>5</sub> 进水 (mg/L)	752		552		623		586	
BOD <sub>5</sub> 出水 (mg/L)	27		20		18		28	
NH <sub>3</sub> -N 进水 (mg/L)	187	179	164	154	169	188	196	181
NH <sub>3</sub> -N 出水 (mg/L)	14	6	7	8	5	5	11	7
TN 进水 (mg/L)	334	266	245	319	230	311	268	234
TN 出水 (mg/L)	26	14	9	11	12	7	23	8
TP 进水 (mg/L)	57	32	47	52	34	38	46	29
TP 出水 (mg/L)	1	4	2	1	3	1	3	2
SS 进水 (mg/L)	231	196	270	206	194	197	221	190
SS 出水 (mg/L)	69	58	75	58	62	53	59	51
pH 进水	6.5	6.7	6.7	6.3	6.1	6.3	6.4	6.2
pH 出水	7.3	6.9	6.7	7.5	7.2	7.2	6.9	6.8

AAO-AO 一体化设备总尺寸(L × B × H)为 7 m × 2 m × 3 m, 见图 4。依次分为厌氧池、缺氧 1 池、好氧 1 池、缺氧 2 池、好氧 2 池、沉淀 1 池, 沉淀 2 池、清水池。厌氧池(DO < 0.2 mg/L)有利于聚磷菌的生长繁殖, 并进行厌氧释磷作用。接着进入缺氧池(0.2 mg/L < DO < 0.5 mg/L)进行反硝化, 脱氮并生成氮气。废液进入好氧池, 在异养菌等作用下进行硝化作用, 废液中大量氨氮被转化为 NO<sup>2-</sup>和 NO<sup>3-</sup>。好氧 1, 2 池至缺氧 1, 2 池配有内回流管, 形成内循环作用, 沉淀 1 池至缺氧 1 池也配有回流管, 形成污泥回流循环(外循环)。

对于 AAO-AO 一体化设备的接种同样选取来自合肥市污水处理厂的污泥, 污泥的培养方式选择闷曝 + 静沉 + 进水[12], 该方法可以为污泥中的细菌微生物等提供缓冲适应能力, 使其尽快适应 AAO-AO 一体化设备中的污水环境。其体系中的污泥会由多减少再增多, 污泥的状态也会由絮状慢慢转化为颗粒状, 即代表体系中的污泥已适应新体系并能提高处理能力。此套 AAO-AO 一体化设备[3]设定进水流量 Q = 5 m<sup>3</sup>/d, 污泥回流比为 80%, 内回流比为 200%, 好氧池混合液浓度 MLSS 为 4000 mg/L, MLVSS 为 2800 mg/L, AAO-AO 池中水力停留时间(HRT)为 14 h。经对 AAO-AO 进水污染物浓度和出水污染物浓度在 2022 年 2 月 17 日至 5 月 26 日的监测, 得到表 6。其中除 BOD 两周一测外, 其余 COD, NH<sub>3</sub>-N, TN, TP, SS, pH 均为一周一次。

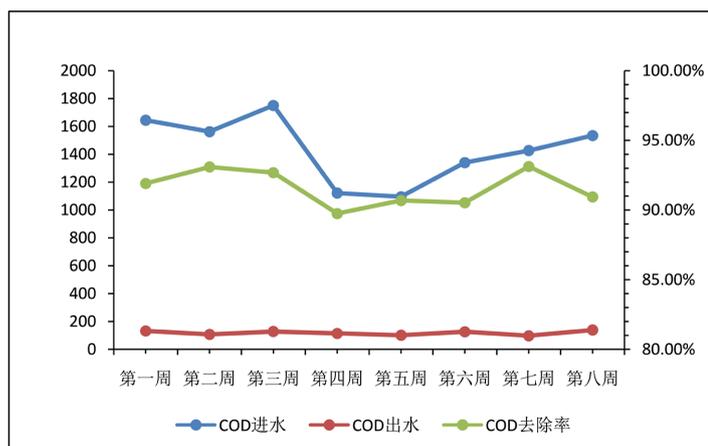


Figure 5. AAO-AO integrated equipment reactor influent and effluent COD concentration and removal rate  
图 5. AAO-AO 一体化设备反应器进水、出水 COD 浓度及去除率

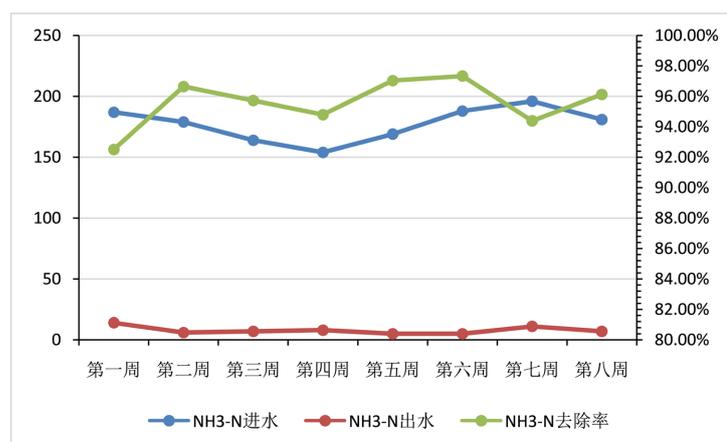
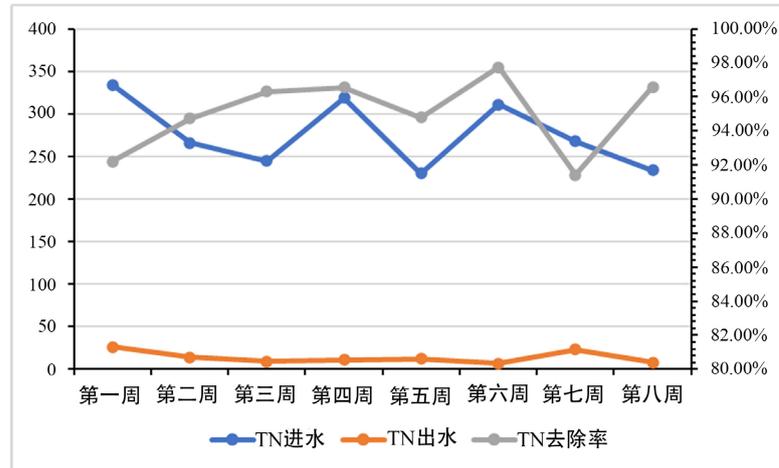
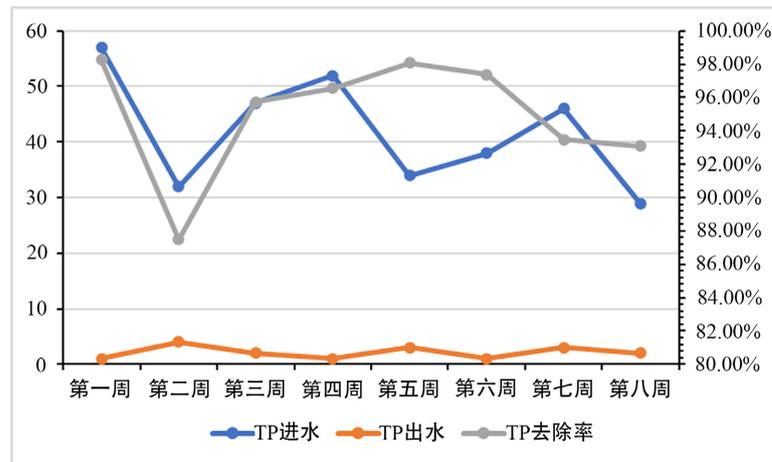


Figure 6. AAO-AO integrated equipment reactor influent and effluent NH<sub>3</sub>-N concentration and removal rate  
图 6. AAO-AO 一体化设备反应器进水、出水 NH<sub>3</sub>-N 浓度及去除率



**Figure 7.** AAO-AO integrated equipment reactor influent and effluent TN concentration and removal rate  
**图 7.** AAO-AO 一体化设备反应器进水、出水 TN 浓度及去除率



**Figure 8.** AAO-AO integrated equipment reactor influent and effluent TP concentration and removal rate  
**图 8.** AAO-AO 一体化设备反应器进水、出水 TP 浓度及去除率

图 5~图 8 分别为自 2022 年 2 月 17 至 5 月 26 日 AAO-AO 一体化设备反应器 COD, NH<sub>3</sub>-N, TN, TP 进水、出水浓度及去除率, 其中 AAO-AO 一体化设备对进水废液 COD 的去除率在 89.75%~93.13 之间, 对进水废液 NH<sub>3</sub>-N 的去除率在 92.51%~97.34%之间, 对进水废液 TN 的去除率在 91.42%~97.75%之间, 对进水废液 TP 的去除率在 87.50%~98.25%之间。

AAO-AO 一体化设备中不同的水池对于餐厨垃圾废液中污染物的去除也不同, 主要可划分为好氧池对 NH<sub>3</sub>-N 的去除, 缺氧池对 TN, TP 的去除, 整体对于废液中 COD 的去除。各水池内部占优生长的细菌也不同, 但由于整个 AAO-AO 一体化设备内部是联通的, 也就意味着, 其内部适宜细菌的生存条件达到了动态平衡, 这一点是十分重要的。在动态平衡下, 各缺氧池, 厌氧池, 好氧池内部优势细菌虽不同, 但对于餐厨垃圾废液的处理却带来了各自的优势。

#### 4. 成本经济分析

本项目每天处理餐厨垃圾废液为 5 m<sup>3</sup>, 项目总投资 105 万, 包括设备投资 80 万, 厂房 25 万。平均日耗电 240 度, 维修费为 1.2 万/年。投加的 PAC 为 0.012 元/m<sup>3</sup> (PAC 单价为 2.4 元/kg), PAM 为 0.07 元

/m<sup>3</sup> (PAM 单价为 10 元/kg)。日常运行人员 2 名, 负责垃圾运输, 分拣与日常餐厨垃圾处理站的管理。

## 5. 存在问题及展望

在整个工艺处理过程中, 会出现餐厨垃圾进料种类差异大, 导致各种污染物浓度起伏较大; 季节变化, 温度差异影响个处理单元内细菌的活性; 人工操作不规范等等。基于此类问题, 未来仍需重点做好以下几点:

(一) 需对收集的餐厨垃圾产生的废液定时抽检, 如若污染物浓度过大, 需及时进行稀释, 防止其对后续生化处理造成破坏性影响。

(二) 对管理人员需进行机器操作培训, 规范日常操作, 及时发现问题。

(三) 调节池中需要调节废液的 pH 和温度。pH 和废液温度均会影响 EGSB 和 A<sup>2</sup>O-AO 一体化设备中细菌和酶的活性。从而造成后续生化处理系统的不稳定性。对关键性处理单元如 EGSB, A<sup>2</sup>O-AO 一体机做好保温措施, 为其内部细菌营造适宜温度条件。

(四) 可通过 PLC 系统控制 EGSB 与 A<sup>2</sup>O-AO 一体化设备的进、出废液量和曝气时间的调控, 直至达到处理最优效果, 从而提升整个系统的稳定性。

(五) 定期对 A<sup>2</sup>O-AO 一体化设备中的厌氧池、缺氧池、好氧池, 进行取样检测, 查看各水池状态包括水温, pH, 气味变化、污泥沉降比、污泥龄、DO 等。

## 6. 结论

此小型餐厨垃圾处理厂采用 EGSB/A<sup>2</sup>O-AO 生化强化处理的方式, 此套工艺为餐厨垃圾分布式小型化处理, 相较于大型餐厨垃圾处理厂具有占地面积小, 投资及运行成本较低及减少运输过程中二次污染等特点, 适用于公司, 机关单位, 学校食堂就地快速解决餐厨垃圾渗滤液。对餐厨垃圾渗滤液处理效果明显, EGSB 反应器在常温下对餐厨垃圾废液的 COD 去除率为 80%~90%, 对 SS 的去除率为 62%~75%。AAO-AO 一体化设备对进水废液 COD 的去除率在 89.75%~93.13 之间, 对进水废液 NH<sub>3</sub>-N 的去除率在 92.51%~97.34%之间, 对进水废液 TN 的去除率在 91.42%~97.75%之间, 对进水废液 TP 的去除率在 87.50%~98.25%之间。最终出水满足《污水排入城镇下水道水质标准》, 且最终出水满足《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31963-2015)。

## 参考文献

- [1] 张存庆. 我国餐厨垃圾法律治理研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- [2] 白钰. 畜禽养殖污染防治管理法律问题研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 辽宁大学, 2022.
- [3] 易龙生, 饶玲华, 王鑫, 王浩. 餐厨垃圾理化性质及其厌氧发酵产气潜力分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1584-1588.
- [4] 刘有胜, 杨朝晖, 曾光明, 肖勇, 杨恋, 徐峥勇. PCR-DGGE 技术对城市餐厨垃圾堆肥中细菌种群结构分析[J]. 环境科学学报, 2007(7): 1151-1156.
- [5] 周俊, 王梦瑶, 王改红, 马利钦, 罗丽雯, 黄焕忠. 餐厨垃圾资源化利用技术研究现状及展望[J]. 生物资源, 2020, 42(1): 87-96.
- [6] Xu, Y., Gong, H. and Dai, X. (2021) High-Solid Anaerobic Digestion of Sewage Sludge: Achievements and Perspectives. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, **15**, Article Number: 71. <https://doi.org/10.1007/s11783-020-1364-4>
- [7] 王毅军, 张振家. EGSB 工艺处理 DMF 废水的试验研究[J]. 工业水处理, 2007(7): 30-32.
- [8] 谢丽. 常温下 EGSB 反应器的运行特性研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [9] 左剑瑟, 王妍春, 陈浩. 膨胀颗粒污泥床(EGSB)反应器的研究进展[J]. 中国沼气, 2000(4): 3-8.
- [10] 官桐乐, 贺超, 刘永红, 王宁. EGSB 处理垃圾焚烧厂渗滤液的启动与运行研究[J]. 工业水处理, 2022, 42(12):

72-77.

- [11] Jing, Z., Wei, Q., Wei, W., Fang, G. and Zheng, X. (2016) Anaerobic Digestion of Heat Treated Sludge Liquor by Pilot Scale Mesophilic EGSB Reactor. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, **9**, 146-153.
- [12] 李茂侨. 长缺氧 A-AAO 工艺在城镇污水处理厂中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.