

# 气浮-A<sup>2</sup>/O-MBR工艺处理校园污水研究

——以西安思源学院为例

李东, 张学梅, 秦宝兰, 付波, 马青华

西安思源学院, 陕西 西安

收稿日期: 2021年12月8日; 录用日期: 2022年1月6日; 发布日期: 2022年1月13日

## 摘要

西安思源学院现运行着4000 m<sup>3</sup>/天规模的气浮-A<sup>2</sup>/O-MBR工艺处理校园污水的再生水厂。气浮池内加入定量聚丙烯酰胺与聚合氯化铝混合絮凝剂。为了研究气浮池与MBR膜生物反应器组合优势,对“进水”、“调节池”、“气浮池”和“出水”取样,并检测COD,氨氮,总氮,总磷,动植物油,pH六种项目。计算多次重复测试数据的算术平均值和标准偏差。比较“进水”与“调节池”的标准偏差得到:经过调节池的均质均量,COD的标准偏差下降了近43%,动植物油的标准偏差下降了近77%。比较“调节池”与“气浮池”的测试数据,可以得出通过气浮池,COD下降41.2%,TP下降25.3%和动植物油下降54.5%。从目前测试数据比较来看,在短期内,有无气浮池对MBR膜生物反应器的出水质量影响不明显。因为西安思源学院再生水厂的规模、目的和极限与其它实验室研究不同,所以除了加强混合絮凝剂的选择和性价比的评估方面的研究外,重点将放在对于系统长期的科学观察、科学测试、数据的搜集和整理。

## 关键词

气浮, MBR工艺, 校园污水, 膜污染

# Gas Float-A<sup>2</sup>/O-MBR Process on Campus Wastewater Treatment

—Taking Xi'an Siyuan College as an Example

Dong Li, Xuemei Zhang, Baolan Qin, Bo Fu, Qinghua Ma

Xi'an Siyuan University, Xi'an Shaanxi

Received: Dec. 8<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jan. 6<sup>th</sup>, 2022; published: Jan. 13<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Xi'an Siyuan University now operates a 4000 m<sup>3</sup>/day gas float-A<sup>2</sup>/O-MBR process to treat campus

文章引用: 李东, 张学梅, 秦宝兰, 付波, 马青华. 气浮-A<sup>2</sup>/O-MBR 工艺处理校园污水研究[J]. 化学工程与技术, 2022, 12(1): 32-39. DOI: 10.12677/hjct.2022.121005

sewage. Polyacrylamide and polymer aluminum chloride as the mixed flocculants was added to the gas float tank. To investigate the advantages of the combination of gas float tank with MBR biofilm bioreactors, "feed water", "regulating pool", "gas floating tank", and "effluent" were sampled, and COD, ammonia nitrogen, total nitrogen, total phosphorus, animal and plant oil, and pH were tested. The arithmetic mean and standard deviation of the data from multiple repeated tests were calculated. After the homogenization of the regulatory pool, the standard deviation of "feed water" and "regulating pool" showed that: the standard deviation of COD decreased by nearly 43%, and that of animal and plant oil decreased by nearly 77%. Comparison of test data from "regulating pools" to "gas floating tank" yielded a 41.2% decrease in COD, 25.3% in TP, and a 54.5% decrease in animal and plant oil. From the comparison of the current test data, there is no effect of gas float tank on the effluent quality of the MBR biofilm bioreactor in the short term. Because the scale, purpose, and limit of the reclaimed water plant of Xi'an Siyuan University are different from other laboratory studies, in addition to strengthening the selection of mixed flocculant and cost performance evaluation, the focus will be on the long-term scientific observation, testing, data collection and interpretation of the system.

## Keywords

Gas Float, MBR Process, Campus Sewage, Membrane Pollution

Copyright © 2022 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. 引言

A<sup>2</sup>/O-MBR (Anaerobic-Anoxic-Aerobic Membrane Bio-Reactor)是一种将活性污泥法和一体化浸没式膜分离系统相结合的新型污水深度处理技术。因为该技术同时具有出水水质稳定达到《城市污水再生利用景观环境用水水质标准》(GB/T 18921-2002), 又有占地面积少的优点, 所以这一过程已经广泛应用于市政和工业污水处理领域[1] [2] [3] [4] [5]。如果仅将部分再生水回用于社区发展, 公园景点高性价比水资源回用, 势必造成该污水深度处理技术投资成本和单位产水量的运行成本高到根本无利可图的困境。一直以来, 经济效益不好是制约 MBR 获得社会投资的根本障碍。

气浮的原理是利用所加的絮凝剂带有正(负)电性的基团和水中带有负(正)电性的难于分离的一些粒子或者颗粒相互靠近, 并利用其聚合性质使得这些颗粒集中。其操作是在已混合好絮凝剂的污水中通空气并产生大量的微细气泡, 形成水、气、被去除物质的三相混合物, 使气泡附着在悬浮颗粒上, 因黏合体密度小于水而上浮到水面, 从而分离密度接近于水和难以沉淀的悬浮物, 例如油脂、纤维、藻类、可溶性杂质。气浮法有可连续操作、应用范围广、基建投资和运行费用小、设备简单、对分离杂质有选择性、分离速度较沉降法快、残渣含水量较低、杂质去除率高、可以回收有用物质等优点[6] [7] [8] [9] [10]。

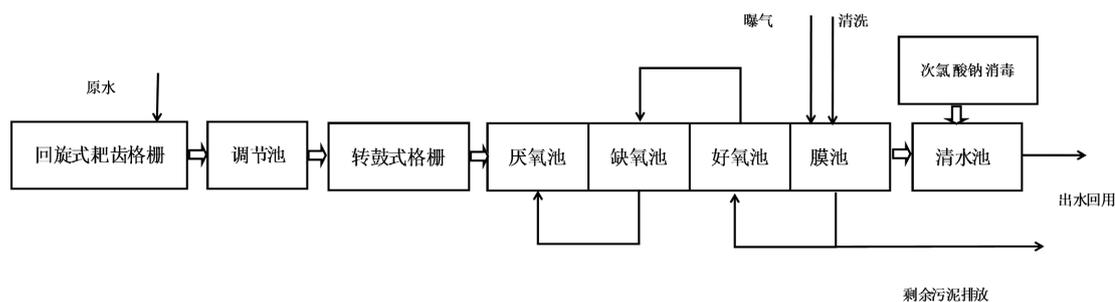
据可查阅的文献记录, 虽然有在实验室规模考察絮凝剂投入活性污泥混合液中能否降低膜污染的影响[11] [12] [13] [14], 但到目前为止, 仅有针对食品废水有机物浓度高, 可生化性好, 易腐败酸化的特点, 某工程设计采用格栅 - 隔油 - 曝气调节 - 气浮-A/O-MBR 组合工艺进行处理的实例[15]。运行结果表明, 在进水 COD<sub>Cr</sub> 高达 8457、BOD<sub>5</sub> 高达 5058 及 SS 的质量浓度为 1406 mg/升时, 经该工艺处理后, COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub> 及 SS 的去除率分别可达 95.4%、98.1%及 98.6%, 出水各指标均能稳定达到 GB 8978-1996《污水综合排放标准》中的三级标准。但是从来没有将气浮池放在从高校污水处理用于生产再生水达到《城市污水再生利用景观环境用水水质标准》A<sup>2</sup>/O-MBR 系统中的报道。本文分析其原因有三, ① 主要是 MBR

本身投资费用高。按西安思源学院[16] [17] [18] [19]本身 4000 m<sup>3</sup>/天处理量的 MBR 污水处理及再生水回用系统决算费用是 2238 万元。② 是系统的操作运行成本高。不包括税金和投资回报的影响成本在第一年至第五年期间是 3.29~3.58 元/m<sup>3</sup>。如果没有更换 MBR 膜组,且膜组的年衰减率控制在 2.85%,在第六年至第十年期间是 2.46~2.64 元/m<sup>3</sup>。③ 是因为单独 A<sup>2</sup>/O-MBR 技术就已经足够高校校园污水处理达到《城市污水再生利用景观环境用水水质标准》,所以没有必要去研究再增加投资(气浮池费用)和增加运行成本(絮凝剂费用)。

由于某个特殊的机缘巧合,西安思源学院将气浮池加入了原来的 A<sup>2</sup>/O-MBR,变为唯一的正常运行 4000 m<sup>3</sup>/天规模气浮-A<sup>2</sup>/O-MBR 工艺处理校园污水的工业规模的实例,所以特别以该文探讨有些技术问题。

## 2. 起因与新流程

从 2011 年开始投入运转的 A<sup>2</sup>/O-MBR 污水处理生产符合合格的再生利用景观环境用水的原工艺见图 1。



**Figure 1.** Production flow chart of original A<sup>2</sup>/O-MBR sewage treatment of Xi'an Siyuan University  
**图 1.** 西安思源学院原 A<sup>2</sup>/O-MBR 污水处理生产流程图

从图 1 可以看出:校园污水经过 5 mm 回旋式耙齿格栅流入调节池,进行进水水质和水量的调节。接下来,调节池中的污水经过 1 mm 转鼓式格栅依次进入厌氧池-缺氧池-好氧池后被泵输送至膜池。在生化池内实现微生物对污染物进行分解消减,包括好氧和缺氧反应区,不能被降解的杂质和活性污泥被膜组件分离后留在膜池内,膜过滤产水则达标回用。

2019 年和 2020 年厨余垃圾的排放使废水成分变化较大,油脂含量很高。在 5 mm 回旋式耙齿格栅和 1 mm 转鼓式格栅都可以看到粘稠的油膜。表 1 列出从 2017 年到 2021 年 9 月总进口水质的平均值。

**Table 1.** Average value of raw water (Unit: mg/L)  
**表 1.** 原水均值(单位: mg/L)

时间	项目	COD	PH	氨氮	动植物油	总氮	总磷
2017 年		332.6	7.6	36.7	6.7	43.3	5.2
2018 年		342.6	7.8	37.6	6.8	44.2	5.3
2019 年		557.4	8.4	38.4	35	45.3	6.6
2020 年		563.9	8.3	40.3	36	50.6	6.4
2021 年		358.7	8.1	35.4	11.9	46.5	5.6

根据我们操作的经验, 如果膜污染势必导致膜的使用寿命缩短, 从而更换新膜使得运转成本增高。鉴于已有不少实验室内向活性污泥中投加絮凝剂, 使得污泥比阻和污泥的微生物代谢产物(SMP)降低, 从而寻求延缓膜污染, 加速恢复膜通量的研究[11] [12] [13] [14]和用于食品废水采用气浮-A/O-MBR 组合工艺的唯一工业应用实例[15], 思源学院在调节池和 1 mm 转鼓式格栅之间, 加入两台型号为气浮 GY-100 池。气浮池尺寸为 9000 mm × 2000 mm × 2500 mm 的 100 m<sup>3</sup>/h 的钢制箱体, 配 2 台 Φ1200 mm × 3000 mm 的溶气罐、容器水泵 2 台, 用一备一或两台全开。气浮池为平底, 出水管位置略高于池底。水面设刮泥机和集泥槽。气浮池内加入两种絮凝剂。PAM 聚丙烯酰胺。0.0143 kg/小时/台。PAC 聚合氯化铝。1.429 kg/小时/台。图 2 为现 A<sup>2</sup>/O-MBR 污水处理生产工艺流程。

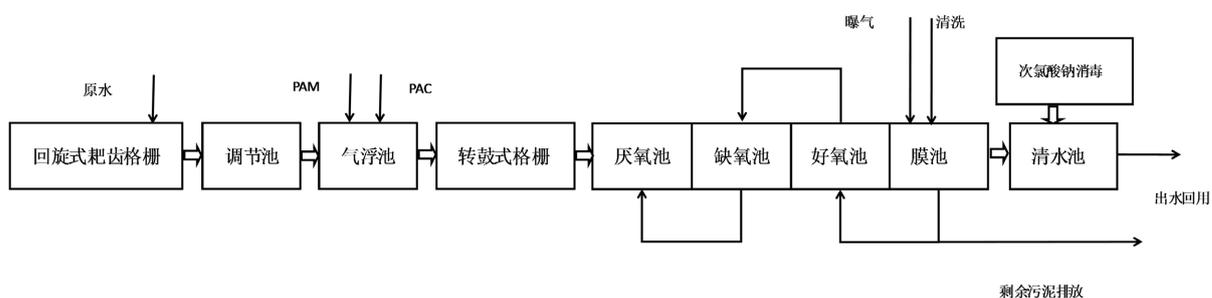


Figure 2. Current A<sup>2</sup>/O-MBR sewage treatment production flow chart of Xi'an Siyuan University

图 2. 西安思源学院现 A<sup>2</sup>/O-MBR 污水处理生产流程图

### 3. 实验步骤、结果与讨论

以前未有将气浮池组合入 A<sup>2</sup>/O-MBR 的工业化规模的研究实例, 所以设计一些实验来研究这新组合技术的水质变化情况。

#### 3.1. 取样点的选择、要求与时间

第一取样点为原水, 记为“进水”。

第二取样点在 1 mm 转鼓式格栅前。当气浮池没有运转时, 该样点的检测数据可以比较调节池的作用, 并将所测数据记为“调节池”。当气浮池运转时, 该样点的检测数据记为“气浮池”。设计第二取样点有双重目的: ① “调节池”数据与“进水”数据的比较可以检验调节池的作用; ② “气浮池”数据与“调节池”数据比较可以研究气浮池的作用。

第三个取样点在膜池后, 记为“MBR 出水”。“调节池”数据与“MBR 出水”数据的比较可以检验无气浮池对膜产水质量的影响。“气浮池”数据与“MBR 出水”数据的比较可以检验有气浮池对膜产水质量的影响。而这两组数据的比较可以检验有或没有气浮池对膜产水质量的影响。

因为该实验不是在实验室内或小型 MBR 设备中, 而是在 4000 m<sup>3</sup>/天的系统中进行, 所以在有气浮池运转和无气浮池运转两种模式转换之间的间隔 7 天以上, 以避免前一个程序对后一个程序的影响。每种模式连续 5 天取样, 取样时间都在下午 2 点。并且整个实验都安排在 2021 年国庆节放假后的 10 月内, 以避免外界气温大的变化和校园活动大的变化(师生数量、餐饮规模、等)造成的影响。

#### 3.2. 检测项目、标准、及数据分析

共检测 COD, 氨氮, 总氮, 总磷, 动植物油, pH。除动植物油使用山东格林凯瑞精密仪器公司出产的 GL-7100 红外分光测油仪测定, 其余均按国家标准。因为校园污水的 pH 值总是在规定的范围之内,

且污水处理的过程中并未加入任何的酸或碱，所以所有的数据中有检测 pH 值，但在后续的讨论中，没有将 pH 值列出。

从统计学上分析，可以计算算术平均值和标准偏差。

$$\text{算术平均值} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1)$$

其中： $X_i$ ——每天的数值； $n$ ——记录的天数。

$$\text{标准偏差} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \text{算术平均值})^2}{n-1}} \quad (2)$$

标准偏差是度量数据分布的分散程度，即用于衡量数据值偏离算术平均值的程度。标准偏差越小，这些值偏离平均值就越少，反之亦然。

### 3.3. 调节池的作用

调节池在污水处理系统中所起的作用一是平均污水进来的质量，二是平均污水进水的数量。比如在校园里，因为作息、上课、就餐时间的有序安排，以及周日或周末的师生活动不同，校园产生的污水进水的数量不同。所以对于特征波动比较大的污水，有必要在污水进入处理主体之前，先将污水导入调节池进行均和调节处理，使其水量和水质都比较稳定，这样就可为后续的水处理系统提供一个稳定和优化的操作条件。表 2 列出进水样和调节池样的测试项目的算术平均值和标准偏差。

**Table 2.** Arithmetic mean and standard deviation of five tests of inlet sample and regulating tank sample (Unit: mg/L)

**表 2.** 进水样和调节池样的五项测试的算术平均值和标准偏差(单位: mg/L)

	COD		NH <sub>3</sub> N		TN		TP		动植物油	
	进水	调节池	进水	调节池	进水	调节池	进水	调节池	进水	调节池
算术平均值	448.1	347	50.175	60.75	81.15	70.6	6.998	6.374	7.958	4.324
标准偏差	63.85	36.41	5.65	7.27	29.28	10.83	0.74	0.81	2.48	0.56

进水 COD 的标准偏差为 63.85%，在通过调节池后该标准偏差降为 36.41%，下降了近 43%。进水的动植物油的标准偏差为 2.48，在通过调节池后该标准偏差降为 0.56%，下降了近 77%。这些数据完全证实调节池起到均质和均量作用。

### 3.4. 气浮池与絮凝剂的作用

气浮池只是一种往已有絮凝剂的待处理污水中灌入空气，活性污泥在经过一定时间后，会繁殖好氧性微生物，这些微生物会形成以菌胶团为主絮凝物，产生很强的吸附与氧化有机物的能力。它可以去除污水中含有溶解性的和胶体状态的可生化有机物，还可以利用活性污泥来吸附废水中所含的悬浮固体以及其他一些物质，同时也能去除废水中部分磷和氮素。表 3 列出气浮池水样和调节池样的测试项目的算术平均值和标准偏差。

对于所测的各项指标，调节池与气浮池之间数据的差别就是气浮池所起的作用。通过计算，可以得出通过气浮池，COD 下降 41.2%，NH<sub>3</sub>N 下降 3.2%，TN 下降 14.3%，TP 下降 25.3%和动植物油下降 54.5%。从测试数据看，气浮池的使用有利于降低所有关心的污染物指标，但动植物油、COD 和总磷 TP 是下降比较明显的。气浮过程中，达到废水充氧的同时，表面活性物质、易氧化物质、细菌和微生物的浓度也

随之降低。

**Table 3.** Arithmetic mean and standard deviation of five tests of air flotation tank water samples and regulating tank samples (Unit: mg/L)

**表 3.** 气浮池水样和调节池样的五项测试的算术平均值和标准偏差(单位: mg/L)

	COD		NH <sub>3</sub> N		TN		TP		动植物油	
	调节池	气浮池	调节池	气浮池	调节池	气浮池	调节池	气浮池	调节池	气浮池
算术平均值	347	204.2	60.75	58.78	70.6	60.5	6.374	4.76	4.324	1.968
标准偏差	36.41	80.58	7.27	4.91	10.83	4.48	0.81	1.35	0.56	1.28

### 3.5. 气浮池对出水水质的影响

表 4 列出调节池样和膜池出水样的测试项目算术平均值和标准偏差。

**Table 4.** Arithmetic mean and standard deviation of five tests of regulating tank samples and water samples (Unit: mg/L)

**表 4.** 调节池样和出水样五项测试的算术平均值和标准偏差(单位: mg/L)

	COD		NH <sub>3</sub> N		TN		TP		动植物油	
	调节池	出水	调节池	出水	调节池	出水	调节池	出水	调节池	出水
算术平均值	347	9.51	60.75	0.004	70.6	32.5	6.374	3.81	4.324	0.53
标准偏差	36.41	3.88	7.27	0.01	10.83	10.22	0.81	0.54	0.56	0.084

表 5 列出气浮池水样和膜池出水样的测试项目的算术平均值和标准偏差。

**Table 5.** Arithmetic mean and standard deviation of five tests of water samples from air flotation tank and water samples from membrane tank (Unit: mg/L)

**表 5.** 气浮池水样和膜池出水样五项测试的算术平均值和标准偏差(单位: mg/L)

	COD		NH <sub>3</sub> N		TN		TP		动植物油	
	气浮池	出水	气浮池	出水	气浮池	出水	气浮池	出水	气浮池	出水
算术平均值	204.2	12.21	58.78	0.003	60.5	26.95	4.76	4.15	1.9686	0.58
标准偏差	80.58	1.83	4.91	0.005	4.48	4.95	1.35	0.62	1.28	0.079

从表 4 与表 5 的数据比较来看, 在短期内, 有无气浮池对 MBR 膜生物反应器的出水质量影响不明显。当然有实验室研究表明投加混凝剂可使带正电的混凝剂粒子与污泥中带负电的胶体粒子相互凝聚, 减少混合液中细微颗粒的含量, 并使形成的滤饼层孔隙率增大, 改善了滤饼层结构, 从而有效阻止胶体物质或其他小分子物质对膜的污染。投加絮凝剂对反应器溶解性微生物产物(SMP)及胞外聚合物(EPS)中的多糖及蛋白质均有一定的去除作用。这说明投加无机絮凝剂能够吸附反应器中的溶解性大分子类物质, 将其转化到固相体系中, 并通过絮凝作用使反应器中的小颗粒物质脱稳聚集形成大颗粒物质, 从而缓解膜污染。

本文所做的研究与这些研究有三点非常重要的不同。① 是规模, 每天 4000 m<sup>3</sup> 的再生水量是实验室规模不可能比拟的。② 是目的, 实验室研究是临界可能存在的机理。而西安思源学院的再生水厂的目的是延长膜使用寿命, 总结出安全可靠运转几年甚至十年的操作程序, 产生经济效益。③ 是测试的极限。

因为本文的目的与实验室试验的目的不同,所以不会在许多极限条件下进行,有时是可以说,见好就收。增加气浮池的初心是减少膜污染,延长膜的使用寿命,提高污水处理再生水回用系统的经济效益。

### 3.6. 一些补充

要想做到同步脱氮除磷,除了对生物反应池的进水水质有要求外,厌氧、缺氧、好氧、膜池的关键工艺控制参数也是关键,特别是生物耗氧量与悬浮固体浓度的比例,在污水处理生物反应池的设计中用污泥负荷  $BOD_5/MLSS$  这一参数。西安思源学院原先的污泥负荷实际操作值是居中[16],高于江苏无锡梅村污水处理厂[1]和云南昆明污水处理厂[2][3],却低于广东广州京溪地下净水厂[4]。因为从来没有任何一个实例是采用气浮-A<sup>2</sup>/O-MBR 工艺处理校园污水,所以在实验中检测到通过气浮池后,使得 COD 下降大于 40%,有可能接近关于活性污泥生化池的下限,两台气浮池就只开一台。

尽管有实验室试验结果显示向活性污泥中投加复合混凝剂后,污泥比阻降低、污泥絮体的平均粒径增大,且污泥的 SMP 含量下降,可以有效改善污泥的沉降性能,增强膜表面的透水性,有降低膜滤饼层污染的逻辑。但正如前面所述,因为规模、目的和极限的不同,本文就不能给出相应的回答。同时,混凝剂种类繁多且混凝效果不一,其对膜污染的改善程度肯定也不尽相同。有鉴于此,西安思源学院再生水厂除了加强对于系统的科学观察、科学测试、数据的长期搜集和整理外,也会进一步加强混合絮凝剂的选择和性价比的评估方面的研究。

## 4. 结论

西安思源学院现运行着 4000 m<sup>3</sup>/天规模的气浮-A<sup>2</sup>/O-MBR 工艺处理校园污水的再生水厂。气浮池内加入混合絮凝剂。一为 PAM 聚丙烯酰胺,0.0143 kg/小时/台;另一为 PAC 聚合氯化铝,1.429 kg/小时/台。有四个取样点,分别为“进水”、“调节池”、“气浮池”和“出水”。共检测 COD,氨氮,总氮,总磷,动植物油,pH 六种项目。计算多次重复测试数据的算术平均值和标准偏差。

比较“进水”与“调节池”的标准偏差得到:COD 的标准偏差下降了近 43%,动植物油的标准偏差下降了近 77%。这些数据完全证实调节池起到均质和均量作用。比较“调节池”与“气浮池”的测试数据,可以得出通过气浮池,COD 下降 41.2%,TP 下降 25.3%和动植物油下降 54.5%,是下降明显的三种污染物。从目前测试数据比较来看,在短期内,有无气浮池对 MBR 膜生物反应器的出水质量没有影响。

因为西安思源学院再生水厂的规模、目的、和极限与其它研究不同,除了加强混合絮凝剂的选择和性价比的评估方面的研究外,重点将放在对于系统的科学观察、科学测试、数据的长期搜集和整理。

## 基金项目

陕西省水利厅科技计划项目。

合同名称:高校中水回用系统技术标准体系研究。

合同编号:2021slkj-14。

## 参考文献

- [1] 聂新宇,罗敏,刘慰,等. 无锡梅村污水处理厂 MBR 工艺多年运行效果分析[J]. 给水排水, 2017, 43(1): 25-27.
- [2] 杨学贵,肖晓文,孙雁,等. 昆明第四水质净化厂 MBR 工艺 7 年运行实践分析[J]. 中国给水排水, 2017, 33(14): 121-127.
- [3] 邱维. 昆明市第九、第十地下污水处理厂设计实例分析[J]. 中国给水排水, 2017, 33(10): 22-27.
- [4] 韦玮. 广州市京溪污水处理厂工程造价分析[J]. 建筑经济, 2011(10): 42-44.
- [5] 曾木海. 污水处理厂污水深度处理工艺综述与案例分析[J]. 净水技术, 2021, 40(5): 75-80.

- [6] 徐海宏, 李满华. 复合絮凝剂在废水处理中的现状和发展方向[J]. 煤炭工程, 2006(11): 58-60.
- [7] 周春琼, 邓先和, 刘海敏. 无机-有机高分子复合絮凝剂研究与应用[J]. 化工进展, 2004, 23(12): 1277-1284.
- [8] 谢建军, 姚庆鑫, 张平. 无机-有机杂化复合混凝/絮凝剂制备与表征方法研究进展[J]. 精细化工中间体, 2014, 44(4): 6-12.
- [9] 罗庆, 张媛, 王小雄. 絮凝剂提高污泥脱水性能的研究进展[J]. 广东化工, 2020, 47(15): 93-94.
- [10] 牛美青, 张伟军, 王东升, 等. 不同絮凝剂对污泥脱水性能的影响研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2126-2133.
- [11] 马延强, 王巧英. 絮凝剂投加对 MBR 工艺膜污染及污泥混合液性能的影响[J]. 净水技术, 2018, 37(7): 58-64.
- [12] 朱亮, 朱凤春, 许旭昌, 等. MBR/PAC 组合工艺处理污水厂尾水的中试研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(5): 59-62.
- [13] 李永明, 唐利, 纪婧, 等. 絮凝剂对 MBR 活性污泥理化性质的影响研究[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2010, 28(6): 558-562.
- [14] 唐利, 邱江平, 李旭东, 等. 复合絮凝剂对 MBR 工艺中污泥性能的影响研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(23): 121-122.
- [15] 郑伟波, 詹嘉玺, 郑卉. 气浮-A/O-MBR 工艺处理食品废水工程实例[J]. 工业用水与废水, 2021, 52(2): 67-69+83.
- [16] 郝静远, 李东, 张学梅, 等. 思源 A<sup>2</sup>O-MBR 多年运行效果与其他相似范例的比较分析[J]. 山西科技, 2018, 33(6): 121-123+127.
- [17] 李东, 张洪生, 付波, 等. 5 年 A<sup>2</sup>O/MBR 中水回用系统经济调查分析——以西安思源学院为例[J]. 给水排水, 2017, 43(S1): 163-166.
- [18] Zhang, X.M., Hao, J.Y., Ma, Q.H., *et al.* (2020) Comprehensive Analysis of 9-Year Running Data of A<sup>2</sup>O-MBR in Xi'an Siyuan University. *Meteorological and Environmental Research*, **11**, 139-143.
- [19] 李东, 郝静远, 马青华, 等. MBR 工艺的长期运行数据分析[J]. 净水技术, 2019, 38(6): 92-96+130.