

Treatment of antibiotic pharmaceutical wastewater by three sludge method

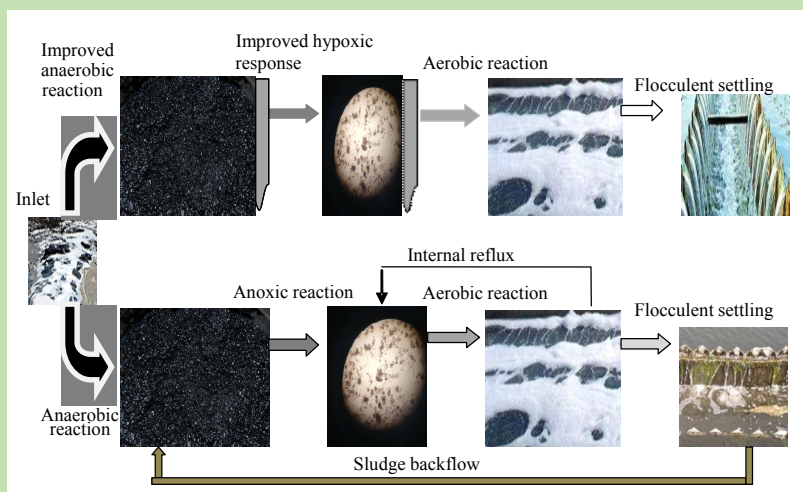
Jianfa CHEN^{1,2,3*}

1. Department of Food and Biotechnology, Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou, Fujian 363000, China

2. Applied Technology Engineering Center of Fujian Provincial University for Deep Processing of Agricultural Products and Safety, Zhangzhou, Fujian 363000, China

3. Collaborative Innovation Center of Fine Chemicals in Fujian Province, Zhangzhou, Fujian 363000, China

Abstract: In order to solve the contradictions in three aspects existing in the traditional AAO method, that was the sludge ages, the demand for carbon source and the phosphorus release of phosphorus accumulating organisms (PAOs) in the anaerobic process influenced by the nitrates carried in the inverse sludge in three kinds of bacteria (i.e., nitrifying bacteria, denitrifying bacteria and PAOs), to reduce a large amount of reflux sludge, to lower power consumption, to make full use of tank capacity, and to improve the



efficiency of sewage treatment practically, the concept of "three sludge" was put forward and the key improvement of AAO was carried out. The improved biochemical reaction tanks such as anoxic tank, anaerobic tank and aerobic tank were equipped with independent automatic separation devices of mud and water to form a unique three sludge system, which were pure anaerobic sludge, pure anoxic sludge and pure aerobic sludge. Each tank was able to control the sludge concentration according to the operation requirements, so that the activated sludge in each tank grew independently in their optimal environment without mutual interference in order to achieve a more efficient biodegradation. The coupling process of the improved AAO +biofilter +flocculation was innovatively designed to treat antibiotic pharmaceutical wastewater and was compared with the traditional combination technology. The results showed that the improved technology had a good treatment effect under the conditions of COD_{Cr} 253~581 mg/L, ammonia nitrogen 29.6~58.5 mg/L, total phosphorus 10.77~23.1 mg/L, design flow rate 30.0 L/h in influent. The average removal rates of COD_{Cr}, ammonia nitrogen and total phosphorus were 80.2%, 73.1% and 96.1%, respectively, which were 6.9%, 6.1% and 3.4% higher than those before improvement, respectively. All three indexes of COD_{Cr}, ammonia nitrogen and total phosphorus in tail water were in accord with the first great standard of the Integrated Sewage Discharge Standards (GB8978-1996).

Key words: three-sludge system; improved AAO method; biofilter; antibiotic wastewater; mixed industrial wastewater

收稿: 2018-12-31, 修回: 2019-03-10, 网络发表: 2019-05-31, Received: 2018-12-31, Revised: 2019-03-10, Published online: 2019-05-31

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项基金资助项目(编号: 2014ZX07215-001); 福建省自然科学基金资助项目(编号: 2015J01356); 福建省中青年教师教育科研项目(编号: JZ180816)

作者简介: 陈建发(1971-), 男, 福建省华安县人, 高级工程师, 教授, 主要从事水污染防治与废物资源综合利用研究, E-mail: diqiuchun01@126.com.

引用格式: 陈建发. 三污泥法处理抗生素类制药废水. 过程工程学报, 2019, 19(3): 644-650.

Chen J F. Treatment of antibiotic pharmaceutical wastewater by three sludge method (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(3): 644-650, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.218344.

三污泥法处理抗生素类制药废水

陈建发^{1,2,3*}

1. 漳州职业技术学院食品与生物工程系, 福建 漳州 363000

2. 农产品深加工及安全福建省高校应用技术工程中心, 福建 漳州 363000

3. 福建省精细化工应用技术协同创新中心, 福建 漳州 363000

摘要: 为有效解决传统 AAO 法中存在的硝化菌、反硝化菌及聚磷菌三种细菌在污泥龄、碳源需求及回流污泥中携带的硝酸盐影响聚磷菌厌氧释放磷这三方面的矛盾, 减少大量污泥回流、降低动力消耗、充分利用池容、切实提高污水处理效率, 提出“三污泥”理念, 对 AAO 进行关键性改进, 改进后的缺氧池、厌氧池、好氧池等生化反应池均自带独立的泥水自动分离的装置, 形成独特的三污泥系统(即纯粹的厌氧污泥、纯粹的缺氧污泥和纯粹的好氧污泥), 各池可根据运营需要各自控制污泥浓度, 使各池中的活性污泥在各自最佳的环境中生长, 互不干扰、相互独立, 更高效发挥生物降解作用, 创新性设计“改进型 AAO 法+生物滤池+絮凝沉淀耦合工艺”处理抗生素类制药废水, 并与传统型组合技术进行比较。结果表明, 进水主要污染物化学需氧量 COD_{Cr} 253~581 mg/L、氨氮 29.6~58.5 mg/L、全磷 10.77~23.1 mg/L、设计流量 30.0 L/h 条件下, 改进型技术取得了很好的处理效果, 其 COD_{Cr}、氨氮、全磷的平均去除率分别达 80.2%, 73.1%, 96.1%, 比改进前分别提高了 6.9%, 6.1%, 3.4%, 尾水 COD_{Cr}、氨氮、全磷等三项指标均达到《污水综合排放标准》(GB8978-1996)的一级标准。

关键词: 三污泥系统; 改进型 AAO 法; 生物滤池; 抗生素废水; 混合工业废水

中图分类号: X787 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2019)03-0644-07

1 前言

抗生素企业生产废水是一种色度高、生物毒性大、内含多种生物抑制物质、成分十分复杂的高浓度极难生物降解的有机废水, 该领域的研究是目前污水处理领域的热点和难点^[1-4], 经企业污水处理站预处理后排入工业区污水管网的废水更难处理^[5-7]。某工业区内共有两家抗菌素药品生产企业, 均通过发酵制药, 抗菌素生产废水占该工业区总废水量的 80%, 污水厂进水水质 B/C 低, 废水极难生物降解。

厌氧-缺氧-好氧法(Anaerobic-Anoxic-Oxic, AAO)工艺是当前污水处理业界常用的生物脱氮除磷方法, 更是国内污水处理的首选工艺之一^[7-10]。截至 2013 年, 国内已建成 AAO 工艺的污水厂共 1071 座, 占国内污水处理厂总数的 25.89%, 仅次于氧化沟。AAO 的研究与实际工程应用对象多以生活污水为主, 以工业废水为研究对象的报道极少, 尤其是针对抗生素类混合工业废水的研究更少见报道。陈建发等^[11]综合对比国内外^[12-15]的研究, 应用 AAO 法+生物滤池+絮凝沉淀耦合工艺处理抗生素类混合废水, 处理效果大大优于污水厂水解酸化+MSBR+絮凝沉淀工艺。AAO 工艺的固有缺点为硝化菌、反硝化菌及聚磷菌(Polyphosphate Accumulating Organisms, PAO)三种细菌在污泥龄(Sludge Retention Time, SRT)、碳源需求及回流污泥中携带的硝酸盐影响聚磷菌厌氧释放磷这三方面存在矛盾, 很难在单一生化系统中同时高效去除氮磷^[16]。且 AAO 需要大量污泥回

流, 增加基建和管道投资, 又减少了有效池容, 动力消耗较高, 为此采用改进型 AAO 法+生物滤池+絮凝沉淀组合技术, 以实际工业废水为实验水质, 考察对抗生素类混合工业废水的处理效果, 以期为极难生物降解的抗生素类混合工业污水的高效处理提供新方法, 为传统 AAO 法的升级改造提供依据。

2 实验

2.1 材料与试剂

氯化锌、盐酸和氢氧化钠(广东西陇化工有限公司)及其它试剂均为分析纯。

实验水样来自某工业集中区污水处理厂调节池随机时段的出水, 以该厂二沉池的回流污泥为接种污泥。经过 20 d 间歇培养后镜检发现, 污泥颗粒很大、沉降性能良好。将污泥浓度(Mixed Liquor Suspended Solid, MLSS)控制在约 3200 mg/L, 再移入相应反应器开展相关实验研究。

2.2 实验装置与分析仪器

2.2.1 实验装置

改进前后的工艺流程见图 1 和 2。传统的 AAO 工艺即厌氧-缺氧-好氧法, 废水与外回流污泥混合后依次流经厌氧池、缺氧池、好氧池, 经多级生物降解后进入二沉池泥水分离, 部分污泥外回流到厌氧池前端, 活性污泥再依次经厌氧池、缺氧池、好氧池后进入二沉池沉淀, 再部分外回流到厌氧池前端, 如此循环。该工艺存在以下 4 个很难解决的问题: (1) 生物脱氮效果难再进

一步提高，原因是内循环量一般以 $2Q(Q$ 为进水流量) 为限，不宜过高；(2) 生物除磷效果也难再提高，因为污泥增殖有一定限度；(3) 为确保二沉池的泥水分离效果，防止二沉池的污泥处于厌氧状态进而释放磷，必须保证进入二沉池的处理水需保持一定浓度的溶解氧，但又要防止循环混合液过高的溶解氧干扰缺氧反应器的生物脱氮反应，所以进入二沉池的处理水溶解氧浓度也不宜过高；(4) 为维持整个生物处理系统的污泥浓度相对稳定，污泥回流量必须足够，因而污泥回流动力消耗大，导致单位污水处理成本偏高。

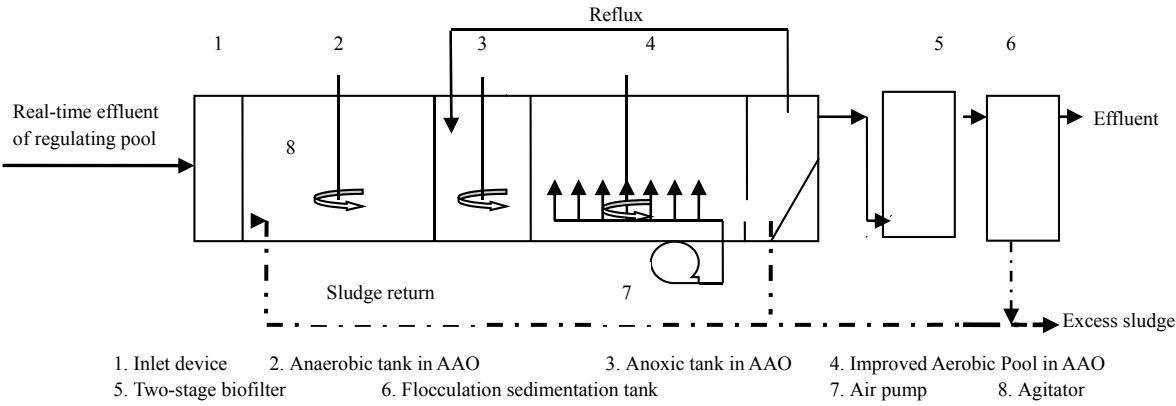


图 1 改进前的实验流程
Fig.1 The experimental device process before improvement

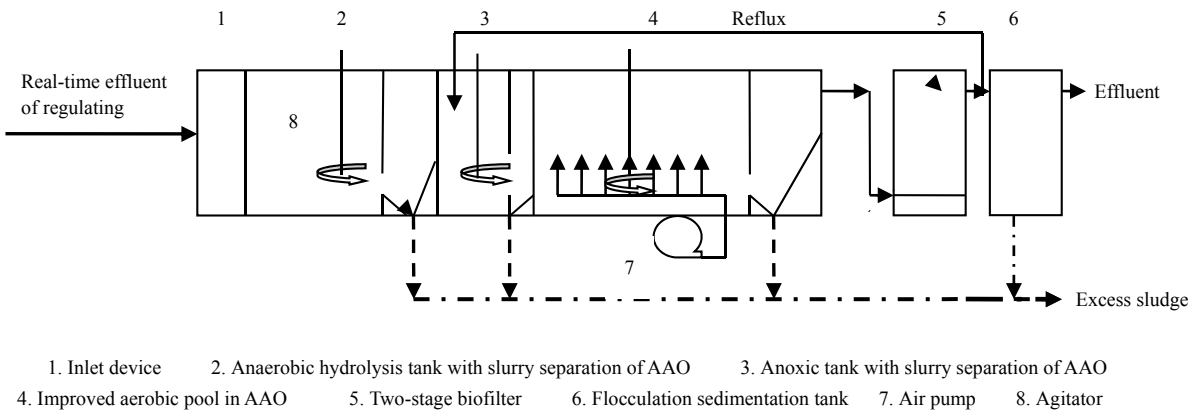


图 2 改进后的实验流程
Fig.2 The experimental device process after improvement

表 1 各生物反应器尺寸及水力停留时间
Table 1 Dimensions and hydraulic residence time of bioreactors

Unit reactor	Length/cm	Width/cm	Height/cm	Effective volume/L	Hydraulic retention time/h
Anaerobic tank	100	100	60	500	16.7
Anaerobic hydrolysis tank with slurry separation	100	100	60	450	16.2
Anoxic tank	100	20	60	100	3.3
Anoxic tank with slurry separation	100	20	60	78	2.8
Aerobic tank with mud automatic separation in AAO	100	135	60	500	16.7
Biofilter	40	40	110	48	1.6
Flocculation sedimentation tank	100	35	40	75	2.5

针对以上缺点，对传统 AAO 进行改进，厌氧池、缺氧池、好氧池等生化反应池均自带独立的泥水自动分离装置避免污泥回流，较大地减少了动力消耗，降低了污水处理成本，且各池可根据需要各自独立排泥、各自控制所需污泥浓度，使各池中的活性污泥在各自最佳的溶解氧环境中生长，形成独特的三污泥系统(即纯粹的厌氧污泥、纯粹的缺氧污泥和纯粹的好氧污泥)，互不干扰、相互独立，有效解决了硝化菌、反硝化菌及聚磷菌三种细菌在污泥龄、碳源需求及回流污泥中携带的硝酸盐影响聚磷菌厌氧释放磷这三方面存在矛盾，可有效提高生物处理效率。

取消污泥外回流，减少大量的污泥回流，减少动力

消耗,降低污水处理成本;改进硝化液回流点位:从原先的好氧池出水回流改为从生物滤池出水回流。脱氮除磷效果与优势菌种的富集程度有关,通过调节工艺参数或投加填料截留优势菌种,可使出水效果得以提高[17,18]。

AAO 法运行管理的关键参数是水力停留时间(Hydraulic Retention Time, HRT),实验中各处理池体的 HRT 参考该污水厂相应单元的 HRT,总水力停留时间与污水厂基本一致,各反应器尺寸及有效容积如表 1 所示。进水及絮凝加药均采用蠕动泵,其余各反应器之间水力连通采用重力流。

2.2.2 分析仪器

BAS224S 型分析电子天平[赛多利斯科学仪器(北京)有限公司],KT370 型可调速搅拌机(启东市汇龙混合设备有限公司),上海精宏 DHG-9076A 电热恒温鼓风干燥箱(上海右一仪器有限公司),ACO-012 型曝气泵(浙江森森实业有限公司),pH 计(上海精密科学仪器有限公司),Uvmini1240 紫外分光光度计[岛津企业管理(中国)有限公司],BT100-2J/YZ1515X 型蠕动泵(保定兰格恒流

泵有限公司),科迪博 9012 型 COD 恒温加热器(青岛科迪博电子科技有限公司)。

2.3 实验方法

2.3.1 处理工艺

根据该污水厂化验室的水质监测数据,调节池出水主要污染物化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD_{Cr})、氨氮(NH₃-N)和全磷(Total Phosphorus, TP)的日平均浓度分别为 253~581, 29.6~58.5 和 10.77~23.1 mg/L。

三污泥耦合工艺采用前期实验确定的最佳内回流比 100%,在处理水量 30 L/h、好氧池溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)为 2~3 mg/L、缺氧池 DO 为 0.2~0.5 mg/L、厌氧池 DO<0.2 mg/L 和搅拌速度 100 r/min 条件下,连续稳定运行 10 d 后,连续 15 d 取样监测,考察三污泥法对 COD_{Cr}, NH₃-N 和 TP 的去除效果,并与 AAO 法+生物滤池+絮凝沉淀及污水厂水解酸化+MSBR+絮凝沉淀两种工艺进行对比。

2.3.2 分析方法

水质检测方法和项目见表 2。

表 2 水质检测方法和项目
Table 2 Water quality testing methods and items

Monitoring project	Method resource	Analysis method
COD _{Cr}	GB11914-89	Dichromate method
NH ₃ -N	HJ535-2009	Nessler's reagent spectrophotometry
Total phosphorus	GB11893-89	Ammonium molybdate spectrophotometric method
Dissolved oxygen	HJ 506-2009	Electrochemical probe method
pH	GB/T 6920-86	Glass electrode method

3 结果与讨论

生物去除效率是衡量污水处理工艺的重要指标,实验着重对 AAO 法+生物滤池+絮凝沉淀组合工艺改进前后的生物去除效率进行比较。

3.1 COD_{Cr} 的去除效果

生物处理段 COD_{Cr} 去除效果如图 3 所示。由图可见,COD_{Cr} 去除率为 75.5%~84.0%,平均去除率为 80.2%,比改进前提高 6.9%。再经絮凝沉淀后,平均 COD_{Cr} 为 65.7 mg/L,远低于一级排放标准 100 mg/L 的要求。进水有机物浓度波动较大,但处理后出水水质相对稳定。COD_{Cr} 的去除主要靠生物降解,这是因为厌氧水解单元和好氧处理单元发挥了很好的生物降解作用。且三污泥法具有较强的抗冲击能力^[11],这是由于改进后的厌氧水解池、缺氧池和好氧池各池都分成两个区,使各池中的活性污泥在各自最佳的环境中生长,避免了回流污泥在厌氧、缺氧、好氧环境中交替循环回流破坏厌氧、缺氧和好氧环境,有利于培养形成特属专性菌群,大大提高

了生物处理效率;且各池的污泥浓度根据需要自行调节、独立控制,各池多余的污泥可独自排至剩余污泥系统,无需污泥回流,形成了独特的三污泥系统。

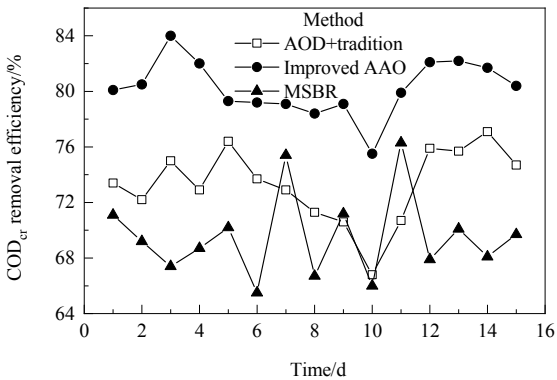


图 3 COD_{Cr} 去除效果
Fig.3 COD_{Cr} removal efficiency

3.2 氨氮的去除效果

NH₃-N 去除效果如图 4 所示。由图可见, NH₃-N 去

除率为 69.3%~76.9%，平均去除率为 73.1%，比改进前提高 6.1%。原因是厌氧段和好氧段发挥了较好的硝化与反硝化作用。出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 达到一级排放标准要求，且对进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度变化有较强的抗冲击能力^[11]。这是由于反硝化细菌和聚磷细菌为短污泥龄细菌，污泥龄越短反硝化速率越快，除磷效果越好。而硝化细菌繁殖速度慢，繁殖周期较长，属长污泥龄细菌，过短的污泥龄会使系统中硝化细菌过量外排而影响其硝化功能。因此在统一的污泥系统中，为获得较好的释磷、反硝化和硝化效果，势必会造成泥龄矛盾。而改进型工艺将活性污泥法和生物膜法结合，将硝化过程从 AAO 中分离出去，用曝气生物滤池(Biological Aerated Filter, BAF)实现硝化，AAO 在短污泥龄条件下运行，以除磷和反硝化为目的，而 BAF 在长污泥龄条件下运行，主要完成硝化，有效解决了传统工艺中硝化细菌与除磷菌之间的泥龄矛盾问题；另一方面，从 BAF 回流来的硝酸盐为 AAO 工艺缺氧段提供了充足的电子受体，为反硝化除磷创造了条件，有利于聚磷菌厌氧释磷，故获得较高的除磷效率^[16,19,20]。且硝化段采用生物膜结构，抗冲击性能较强^[21]。

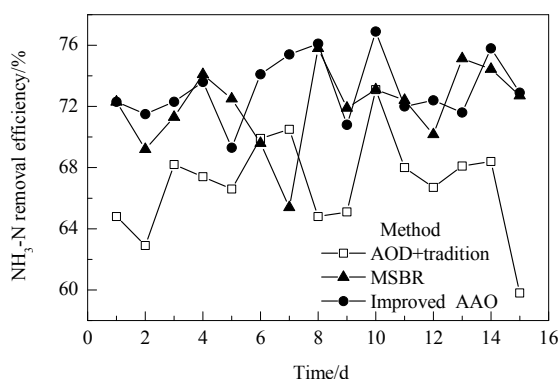


图4 氨氮去除效果

Fig.4 $\text{NH}_3\text{-N}$ removal efficiency

3.3 全磷的去除效果

生物处理段全磷去除效果如图 5 所示。由图可见，该工艺的生物除磷效果很好。TP 去除率为 94.6%~97.4%，平均去除率为 96.1%，比改进前提高 3.4%。再经絮凝沉淀，TP 平均总去除率为 98.9%，最终出水平均 TP 为 0.179 mg/L，远低于一级标准 0.5 mg/L 的要求，且三污泥法对进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度变化有较强的抗冲击能力^[11]。

厌氧段释磷是保证系统稳定运行的最关键因素^[21]。传统 AAO 工艺中回流污泥中含大量硝酸盐，回流到厌氧区后会优先利用进水中的挥发性脂肪酸(Volatile Fatty Acid, VFA)等易降解碳源进行反硝化，从而使厌氧释磷

所需碳源不足，影响了系统充分释放磷，从而影响聚磷菌在好氧池的吸磷量，最终使除磷量减少，除磷效率降低。

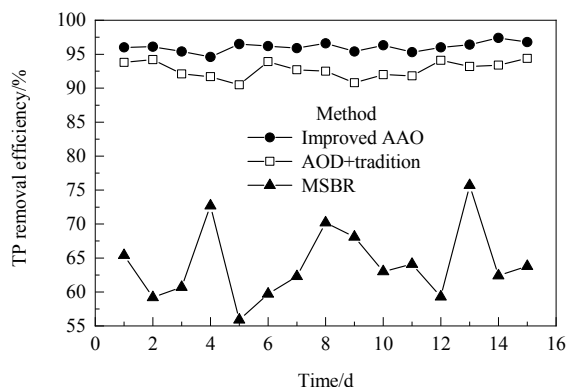


图5 全磷去除效果

Fig.5 TP removal efficiency

3.4 与污水厂实际运行效果比较

相同进水条件下，对三污泥法与污水厂水解酸化+MSBR+絮凝沉淀工艺的生物去除率进行比较。

3.4.1 COD_{Cr} 生物去除效果对比

污水厂 COD_{Cr} 平均生物去除率为 69.5%。三污泥法对 COD_{Cr} 的去除效果明显优于该污水厂水解酸化+MSBR+絮凝沉淀工艺，略差于污水厂厌氧水解+MSBR+臭氧氧化+絮凝沉淀+曝气生物滤池^[1]提标工艺(其 COD_{Cr} 平均去除率为 83.2%)，但仍达到一级排放标准。

3.4.2 氨氮的生物去除效果对比

污水厂平均氨氮去除率为 72.0%。三污泥法对氨氮的去除效果略优于该污水厂水解酸化+MSBR+絮凝沉淀工艺，与污水厂厌氧水解+MSBR+臭氧氧化+絮凝沉淀+曝气生物滤池^[1]提标工艺(其 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率为 77.9%)相近，也达到一级排放标准。

3.4.3 全磷的生物去除效果对比

污水厂 TP 平均生物去除率为 64.2%。三污泥法对 TP 的去除效果大大优于该污水厂水解酸化+MSBR+絮凝沉淀工艺，略优于污水厂厌氧水解+MSBR+臭氧氧化+絮凝沉淀+曝气生物滤池^[1]提标工艺(其 TP 平均去除率为 95.6%)，也达到一级排放标准。

4 结论

提出三污泥耦合方法，对极难生物降解的抗生素类混合工业污水进行处理，得到如下结论：

(1) 出水 COD_{Cr}、氨氮、全磷等三项均达到并优于《污水综合排放标准》的一级标准，且该工艺处理效果稳定可靠，运行成本较低。

(2) 改进后的缺氧池、厌氧池、好氧池等生化反应池均自带独立的泥水自动分离的装置避免了污泥回流,较大地减少了动力消耗,降低了污水处理成本,延长了水力停留时间,且各池可根据运营需要各自控制污泥浓度,使各池中的活性污泥在各自最佳的环境中生长,形成独特的三污泥系统,大大提高了生物处理效率。

(3) 与 AAO 法+曝气生物滤池+絮凝沉淀池耦合工艺相比,三污泥法对 COD_{Cr}, NH₃-N, TP 的平均去除率分别达到 80.2%, 73.1%, 96.1%, 比改进前分别提高了 6.9%, 6.1%, 3.4%。

(4) 相同进水条件下,三污泥法对 COD_{Cr}, NH₃-N, TP 的平均去除率大大优于污水厂水解酸化+MSBR+絮凝沉淀工艺,与厌氧水解+MSBR+臭氧氧化+絮凝沉淀+曝气生物滤池提标工艺相近。

参考文献:

- [1] 陈建发,林诚,刘福权.复合工艺处理以抗生素类制药为主的混合工业废水[J].工业水处理,2014,34(10):91-94.
Chen J F, Lin C, Liu F Q. Studies on the treatment of antibiotics pharmacy-based mixed industrial wastewater using composite technology[J]. Industrial Water Treatment, 2014, 34(10): 91-94.
- [2] 曹猛,冉阿倩,赵应宏,等.预处理+SBR+MBR 处理抗生素制药废水试验研究[J].工业水处理,2010,30(7):28-32.
Cao M, Ran A Q, Zhao Y H, et al. Experimental study on the treatment of antibiotic pharmaceutical wastewater by pretreatment+SBR+MBR[J]. Industrial Water Treatment, 2010, 30(7): 28-32.
- [3] 陈建发,林诚,刘福权,等. MicroFA 四相催化氧化技术在二级生化处理出水深度处理的应用[J].四川大学学报,2014,51(4):797-803.
Chen J F, Lin C, Liu F Q, et al. Application of microfa four-phase catalytic oxidation technology on the advanced treatment of effluent of secondary biochemical treatment[J]. Journal of Sichuan University, 2014, 51(4): 797-803.
- [4] 赵应宏,冉阿倩,曹猛.混凝法处理抗生素制药废水研究[C]//中国环境科学学会.中国环境科学学会2009年学术年会论文集.北京:北京航空航天大学出版社,2009:213-217.
Zhao Y H, Ran A Q, Cao M. Coagulation method antibiotic pharmaceutical wastewater treatment research [C]//China Environmental Science Society. Proceedings of China Environmental Science Society in 2009. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2009: 213-217.
- [5] 陈建发,陈艺敏,黄慧珍,等.新型填料曝气生物滤池处理抗生素类废水[J].环境工程学报,2014,8(8):3315-3323.
Chen J F, Chen Y M, Huang H Z, et al. Treating antibiotics wastewater by the new biological aerated filter[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(8): 3315-3323.
- [6] 陈建发. AAO 耦合生物滤池法处理抗生素类生产废水机理探讨[J].长江大学学报(自然科学版),2015,12(33):40-44.
Chen J F. Discussions on mechanism of antibiotics based mixed industrial wastewater treatment by AAO combined BAF[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(33): 40-44.
- [7] 安少锋.城市污水 A~2/O 处理工艺的运行与探讨[D].西安:西安建筑科技大学,2011:23-24.
An S F. Discussion and operation of A~2/O municipal wastewater treatment [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology Building, 2011: 23-24.
- [8] 侯亚辉. A~2/O、倒置 A~2/O 和前置缺氧 A~2/O 工艺处理城市污水比较研究[D].郑州:郑州大学,2010:51-63.
Hou Y H. A Contastive study among the A~2/O process, the inverted A~2/O process and the pre-anoxia A~2/O process on treatment of municipal sewage [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010: 51-63.
- [9] 刘秀峰. A~2/O 工艺的提升改造工艺[D].太原:太原理工大学,2010:3-6.
Liu X F. The improved process of A~2/O process [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010: 3-6.
- [10] 李柏林. A/A/O 氧化沟工艺强化脱氮调控技术研究[D].重庆:重庆大学,2012:58-60.
Li B L. Study on strengthening nitrogen removal in A/A/O oxidation ditch process by regulation technology [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012: 58-60.
- [11] 陈建发,刘福权,姚红照,等.“AAO 法+生物滤池+絮凝沉淀”法处理抗生素类制药废水[J].工业水处理,2014,34(5):21-24.
Chen J F, Liu F Q, Yao H Z, et al. Treatment of antibiotic pharmaceutical wastewater by using the A²O+biofilter+floculation and sedimentation method [J]. Industrial Water Treatment, 2014, 34(5): 21-24.
- [12] 高品.典型抗生素和抗性基因在污水处理系统中的归趋及迁移分布规律[D].上海:东华大学,2011:12-16.
Gao P. Fate, Transport and distribution of typical antibiotics and antibiotic resistance genes in a sewage treatment system [D]. Shanghai: Donghua University, 2011: 12-16.
- [13] 杨维本.高效复合微生物菌群处理城市污水的初步研究[D].南京:南京工业大学,2002:20-24.
Yang W B. Preliminary study of efficient complex microbial flora in urban sewage treatment [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2002: 20-24.
- [14] 张雨.西安市某倒置 A~2/O 生物脱氮除磷工艺问题解析与升级改造[D].西安:西安建筑科技大学,2014:56-57.
Zhang Y. The Analysis on biological nitrogen and phosphorus removal and upgrading reconstruction of Xi'an inverted A²O process [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology Building, 2014: 56-57.
- [15] 张卉.基于生物选择器改良 A~2/O 工艺除磷脱氮效能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011:24-34.
Zhang H. Research on phosphorus and nitrogen removal by modified A~2/O process based on biological selector [D]. Haerbin: Haerbin Institute of Technology, 2011: 24-34.
- [16] 陈永志. A~2/O-BAF 系统深度脱氮除磷[D].北京:北京工业大学,2012:31-38.
Chen Y Z. Enhanced removal of nitrogen and phosphorus by A²O-BAF system [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012: 31-38.
- [17] 杨鹏程. MUCT 与 A~2/O 工艺应用于城市污水处理厂 AO 工艺提标改造的工艺条件研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013:56-57.
Yang P C. Determining the operational condition of MUCT and A²O processes for AO process upgrading for municipal wastewater treatment [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology

- Building, 2013: 56–57.
- [18] 王伟, 彭永臻, 孙亚男. 污泥回流比对分段进水 A/O 生物脱氮工艺的影响 [J]. 中国环境科学, 2008, 28(2): 116–120.
Wang W, Peng Y Z, Sun Y N. The influence of sludge recycle ratio on the step-feed A/O biological nitrogen removal process [J]. China Environmental Science, 2008, 28(2): 116–120.
- [19] 邹伟国, 张善发, 张辰, 等. 新型双污泥脱氮除磷工艺处理生活污水 [J]. 中国给水排水, 2004, 20(6): 16–18.
Zou W G, Zhang S F, Zhang C, et al. New type two sludge process for removal of nitrogen and phosphorus from domestic sewage [J]. China Water & Wastewater, 2004, 20(6): 16–18.
- [20] 吴蕾. 双污泥系统颗粒污泥的培养及脱氮除磷性能 [D]. 北京: 北京工业大学, 2012: 5–8.
Wu L. Cultivation of granular sludge and performance of nitrogen and phosphorus removal in two sludge system [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012: 5–8.
- [21] 令云芳. 厌氧/缺氧/硝化双污泥反硝化除磷 [D]. 北京: 北京工业大学, 2006: 43–63.
Ling Y F. Denitrifying phosphorus removal in anaerobic–anoxic–nitrification double sludge system [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006: 43–63.