

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.15.015

改良A²/O—MBR工艺仿真模拟及运行优化

何春求¹, 周少奇^{1,2}

(1. 华南理工大学 环境与能源学院, 广东 广州 510006; 2. 贵州科学院, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 针对常规A²/O工艺在处理低碳源城镇污水时脱氮除磷效率较低的问题,设计开发了改良A²/O—MBR强化同步脱氮除磷中试系统。以广州某污水处理厂细格栅出水为原水,研究了该系统的处理效能及稳定性。结果表明,当进水COD、NH₄⁺-N、TN、TP、SS分别为79~163、19.0~30.8、24.3~39.3、2.00~3.31、60~164 mg/L时,出水COD、NH₄⁺-N、SS平均浓度分别为9.09、0.38、1.13 mg/L。增加缺氧池与厌氧池之间的循环后,TN去除率提高了11.5%,TP去除率提高了12.2%。基于BioWin软件建立了该系统的数学模型,利用校准好的模型对运行参数进行优化。优化结果表明,当硝化液回流比为200%、缺氧混合液回流比为150%、污泥回流比为100%、污泥龄为20 d、好氧池溶解氧浓度为1.25~1.75 mg/L、甲醇投加量为33 mg/L时,对污染物的去除效果最佳。

关键词: 改良A²/O—MBR工艺; 低碳源城镇污水; BioWin仿真模拟; 脱氮除磷; 运行优化

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2022)15-0090-08

Simulation of Modified A²/O—MBR Process and Its Operation Optimization

HE Chun-qiu¹, ZHOU Shao-qi^{1,2}

(1. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, China)

Abstract: Conventional A²/O process has low removal efficiency of nitrogen and phosphorus in the treatment of low carbon source municipal wastewater. A pilot-scale modified A²/O—MBR process was thus designed and developed to enhance simultaneous nitrogen and phosphorus removal. The performance and stability of the system for the treatment of effluent from fine grids of a municipal wastewater treatment plant in Guangzhou were investigated. When COD, NH₄⁺-N, TN, TP and SS in influent were 79~163 mg/L, 19.0~30.8 mg/L, 24.3~39.3 mg/L, 2.00~3.31 mg/L and 60~164 mg/L, respectively, the average COD, NH₄⁺-N and SS in effluent were 9.09 mg/L, 0.38 mg/L and 1.13 mg/L, respectively. After increasing the circulation between anoxic tank and anaerobic tank, the removal efficiencies of TN and TP increased by 11.5% and 12.2%. A mathematical model of the process was established based on BioWin software, and the operating parameters were optimized by using the calibrated model. The best removal performance of pollutants was obtained when the following optimized parameters were adopted: nitrification liquid reflux ratio of 200%, anoxic mixed liquid reflux ratio of 150%, sludge reflux ratio of 100%, sludge age of 20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400702)

通信作者: 周少奇 E-mail: fesqzhou@yeah.net

days, dissolved oxygen in aerobic tank of 1.25–1.75 mg/L and methanol dosage of 33 mg/L.

Key words: modified A²/O—MBR process; low carbon source municipal wastewater; BioWin simulation; nitrogen and phosphorus removal; operation optimization

A²/O是我国现有城市污水处理厂的常规工艺,由于基质之间竞争和污泥龄等问题,该工艺在处理低碳源城镇污水时脱氮除磷效率较低^[1]。针对上述问题,对该工艺进行了改良:杨胤等^[2]改变了厌氧池、缺氧池、好氧池的体积比,柯浪文等^[3]采用多点进水和增设预缺氧池的改良A²/O工艺,王雪等^[4]设计了前置调蓄池的改良型A²/O工艺,李航等^[5]采用了优化初沉池的改良A²/O工艺,由于进水中碳源较低,脱氮除磷效果难以进一步提高。近年来,膜生物反应器(MBR)因具有污染物去除率高、装置紧凑、剩余污泥产量少等优点,在实际工程中得到普遍应用^[6]。

污水处理过程异常复杂,利用活性污泥数学模型并通过计算机软件仿真,可在短时间内完成大量模拟试验^[7-8]。Gabarrón等^[9]利用ASM2d模型对MBR工艺进行优化,降低了曝气量。邵袁等^[10]采用WEST软件对乡镇污水厂进行优化,降低了成本。罗凡等^[11]利用活性污泥工艺模拟软件构建工艺模型,提出了多种优化改造路径。沈昌明等^[12]对改良A²/O工艺进行了仿真模拟,模拟结果对整个污水厂的优化运行和节能降耗具有指导意义。国际水协(IWA)推出的ASM_s系列模型被广泛应用于污水处理领域,成为污水处理新工艺研发、污水厂优化设计和运行管理的重要平台^[13-14]。

基于此,笔者针对A²/O工艺处理低碳源城镇污水脱氮除磷效率较低的问题,对其进行了大胆创新:将缺氧池分为两段,增加缺氧混合液在缺氧池和厌氧池之间的循环,采用BioWin软件对改良后的A²/O—MBR工艺进行模拟和运行优化。

1 材料与方法

1.1 中试装置

改良A²/O—MBR工艺流程如图1所示。该工艺在A²/O的基础上添加了一个缺氧池,同时增加了缺氧混合液回流。整个试验装置由钢板制成,反应器边界长、宽、高分别为6.0、2.5和2.5 m,有效水深为2.0 m,总体积为37.5 m³。装置由厌氧池、缺氧池1、缺氧池2、好氧池和膜池组成,总有效体积为

29.2 m³。厌氧池与缺氧池均通过机械搅拌装置使污泥处于悬浮状态。好氧池底部布设大量的微孔曝气头,采用功率为7.5 kW的空气压缩机进行曝气。膜池采用浸没式聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维增强型膜组件,外形尺寸为2.6 m×0.7 m×1.3 m的不锈钢膜架,膜下方设有穿孔曝气管,采用功率为7.5 kW的空压机进行曝气。试验装置主要配套设备包括液下搅拌机2台、电磁流量计4个、气体流量计2个、空压机2台(1备1用)、污泥回流泵1台、混合液回流泵2台、出水抽吸泵2台。

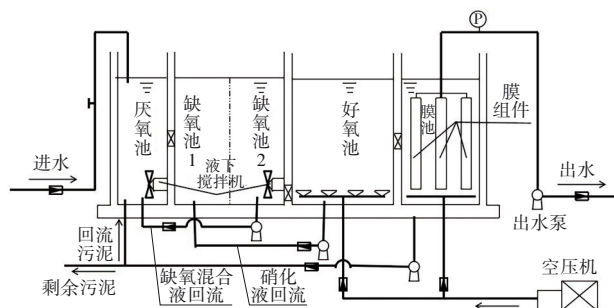


图1 改良A²/O—MBR工艺流程

Fig.1 Flow chart of modified A²/O—MBR process

1.2 膜组件

膜组件主要包括复合膜(PVDF)、内衬管(聚对苯二甲酸乙二醇酯,PET)、集水管(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物,ABS)、聚氨酯或环氧胶水、硅胶等。中空纤维膜型号为JS-MBR,膜丝内径为0.9 mm,外径为2.2 mm,孔径为0.1~0.2 μm,设计通量为6~10 L/(m²·h),含28支13 m²的膜片,膜总面积为364 m²,抽吸压力为0.01~0.05 MPa。

1.3 进水水质

进水为广州某污水处理厂细格栅出水,水质如下:COD为79~163 mg/L,均值为113 mg/L;NH₄⁺-N为19.0~30.8 mg/L,均值为24.7 mg/L;TN为24.3~39.3 mg/L,均值为31.4 mg/L;TP为2.00~3.31 mg/L,均值为2.57 mg/L;SS为60~164 mg/L,均值为101 mg/L。

1.4 分析方法

COD采用快速消解分光光度法测定;NH₄⁺-N采

用纳氏试剂分光光度法测定;TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;总磷采用钼酸铵分光光度法测定;SS采用重量法测定;DO采用便携式溶解氧仪测定;pH采用便携式pH计测定。

1.5 装置的启动与运行

试验所用接种污泥取自该污水处理厂污泥浓缩池(污泥浓度约为20 000 mg/L),污泥沉降性能良好,按污泥与污水的体积比为1:5将接种污泥投入到试验装置内,闷曝24 h以后静置一段时间,弃掉上清液,放入试验用水,再闷曝24 h,然后连续进水,运行15 d以后出水水质稳定,取样测得厌氧池、缺

氧池、好氧池和膜池的MLSS平均值分别为3 360、3 840、3 840和6 560 mg/L。为了使MBR工艺运行稳定,建议按抽吸7 min、停止3 min的运行周期进行间歇运行,膜池MLSS浓度最好控制在5 000~8 000 mg/L。

膜组件的污染情况通过负压表观测,当跨膜压差(TMP)达到50 kPa时,需对其进行清洗。整个中试过程分为4个阶段进行,调节进水流量分别为1.72、2.08、2.65和3.65 m³/h,对应的水力停留时间分别为17、14、11和8 h,考察不同进水流量下装置的运行效果,反应器的运行参数见表1。

表1 反应器的运行参数

Tab.1 Reactor operation parameters

| 项 目 | 改良A ² /O工艺 | | | | MBR工艺 | | | |
|-----|---|-------------|-------------|----------|---|------------|---------|----------------------------|
| | 进水流量/(m ³ ·h ⁻¹) | 水力停留时间HRT/h | 好氧池曝气量(气水比) | 硝化液回流比/% | 膜通量/(L·m ⁻² ·h ⁻¹) | 膜池曝气量(气水比) | 污泥回流比/% | MLSS/(mg·L ⁻¹) |
| 工况1 | 1.72 | 17 | 5:1 | 200 | 4.71 | 10:1 | 50~70 | 5 000~8 000 |
| 工况2 | 2.08 | 14 | 5:1 | 150 | 5.72 | 10:1 | 50~70 | 5 000~8 000 |
| 工况3 | 2.65 | 11 | 5:1 | 150 | 7.29 | 10:1 | 50~70 | 5 000~8 000 |
| 工况4 | 3.65 | 8 | 5:1 | 200 | 10.02 | 10:1 | 50~70 | 5 000~8 000 |

1.6 模型构建

BioWin软件模拟流程如图2所示。

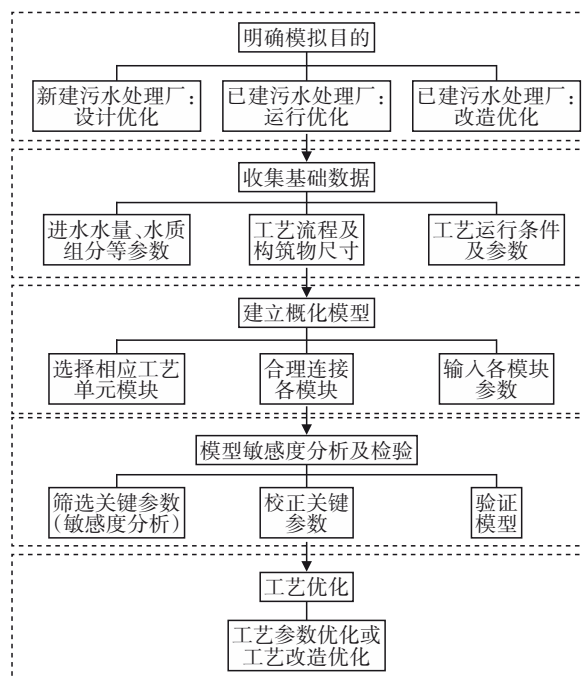


图2 BioWin软件模拟流程

Fig.2 Flow chart of BioWin software simulation

BioWin软件包含稳态和动态两个分析器^[15],其以综合活性污泥-厌氧消化(ASDM)数学模型为依

据^[16],除了可以对生物脱氮除磷和厌氧消化工艺进行模拟外,还能够对固定生物膜和生物移动床工艺进行模拟^[17]。根据改良A²/O—MBR工艺的流程和各构筑物的实际测量尺寸,通过BioWin 6.0软件建立该工艺的模型,结果如图3所示。

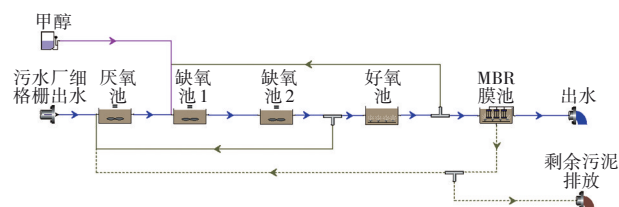


图3 改良A²/O—MBR工艺模型

Fig.3 Model of modified A²/O—MBR process

2 结果与讨论

2.1 改良A²/O—MBR工艺的运行效果

2.1.1 对COD和SS的去除

改良A²/O—MBR工艺对COD的去除效果如图4所示。可知,当进水COD为79~163 mg/L时,出水COD为6.23~17 mg/L,平均为9.09 mg/L,平均去除率为91.7%。当进水SS为60~164 mg/L时,出水SS为0.2~3.4 mg/L,平均为1.13 mg/L,平均去除率为98.9%,出水COD和SS均优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。通

过对工况1膜池上清液COD的测试发现,当膜池上清液COD为18~47 mg/L(平均值为30.6 mg/L)时,对膜池上清液COD的平均去除率为71.2%,即膜过滤对COD具有明显的去除作用。当进水流量为1.72、2.08、2.65和3.65 m³/h时,对COD的去除率分别为91.7%、91.7%、91.8%和92.6%,表明进水COD和进水流量对COD的去除效果影响较小,该工艺对COD具有非常好的去除效果。

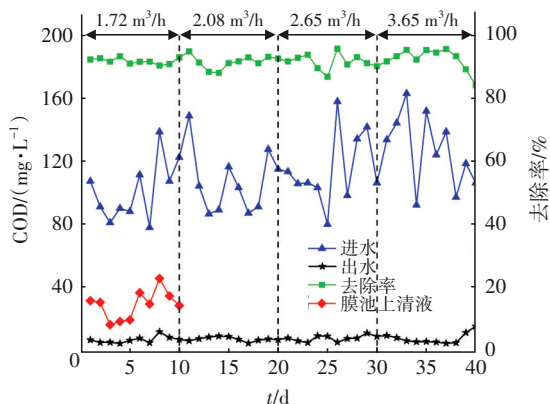


图4 改良A²/O—MBR工艺对COD的去除效果

Fig.4 Removal effect of COD by modified A²/O-MBR process

2.1.2 对氮素的去除效果

当进水NH₄⁺-N浓度为19.0~30.8 mg/L时,出水NH₄⁺-N浓度为0.14~1.27 mg/L,平均为0.38 mg/L,平均去除率为98.5%。通过对膜池上清液和出水NH₄⁺-N浓度的检测发现,二者浓度相近,这是由于膜本身对相对分子质量较小的NH₄⁺-N没有截留作用。当进水流量为1.72、2.08、2.65和3.65 m³/h时,对NH₄⁺-N的去除率分别为98.2%、98.6%、98.4%和98.6%。由此可知,该工艺对NH₄⁺-N的去除效果受进水NH₄⁺-N浓度和进水流量的影响较小。

改良A²/O—MBR工艺对TN的去除效果如图5所示。可知,进水TN浓度最低为24.3 mg/L,最高为39.3 mg/L,平均为31.4 mg/L,且COD/TN=3.6。冉治霖等^[18]认为,当C/N值为5.8时,工艺具有较好的脱氮除磷效果。经过改良工艺处理后,出水TN的平均浓度为18.1 mg/L,平均去除率为42.2%,表明在进水碳源严重不足的情况下,该工艺仍然具有较好的脱氮效果。反应器运行初期,缺氧混合液回流比为150%,平均TN去除率为52.0%,但是当反应器运行10 d后,取消缺氧混合液的回流,TN去除率下降到36.5%。反应器运行30 d后,重新增加缺氧混

合液回流比为150%,对总氮的去除效果明显提升,平均TN去除率为43.9%。试验结果表明,增加缺氧池和厌氧池之间的内循环,总氮去除率提高了11.5%。此外,工况1和工况4的脱氮效果优于工况2和工况3,表明增大硝化液回流比对脱氮效果有一定的提高作用。

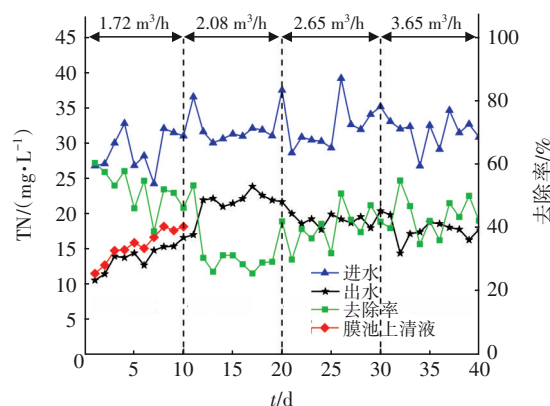


图5 改良A²/O—MBR工艺对TN的去除效果

Fig.5 Removal effect of TN by modified A²/O-MBR process

2.1.3 对TP的去除效果

改良A²/O—MBR工艺对TP的去除效果如图6所示。

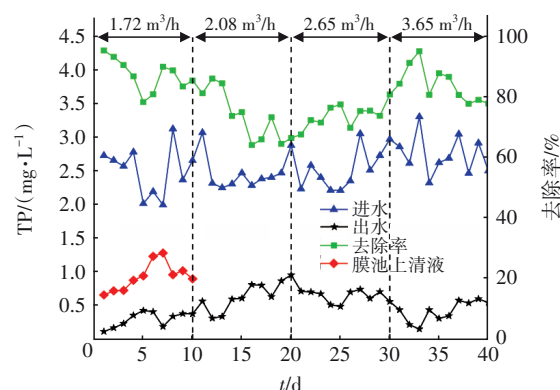


图6 改良A²/O—MBR工艺对TP的去除效果

Fig.6 Removal effect of TP by modified A²/O-MBR process

从图6可以看出,当进水TP为2.00~3.31 mg/L时,出水TP为0.125~0.965 mg/L,平均为0.51 mg/L,平均去除率为79.8%。通过测定膜池上清液TP浓度发现,膜池上清液TP浓度为0.67~1.29 mg/L,平均浓度为0.94 mg/L,表明膜对TP具有明显的去除效果(平均去除率为67.1%)。装置运行初期,对TP的去除率为87.3%,运行10 d后,取消缺氧混合

液的回流,TP去除率下降到73.9%,运行30 d后又重新增加缺氧混合液的回流,TP去除率提高到84.9%。试验结果表明,增加缺氧混合液的回流后,TP去除率提高了12.2%。在污水处理过程中,主要通过生物除磷、化学除磷和结晶除磷作用去除磷^[19]。该工艺运行过程中,磷主要通过生物除磷的方式被去除。

2.2 模型的校验

为了提高模型模拟预测的准确度,需对进水组分进行测定,主要涉及有机物、氮和磷等组分,其中进水COD组分按照文献[20]进行测定。进水组分参数如下:快速降解COD(包括醋酸)、非降解溶解COD、非降解颗粒COD与总COD的比分别为0.21、0.05和0.15;氨氮与总凯氏氮的比为0.79;磷酸盐与总磷的比为0.74。其余参数采用缺省值。

模型参数(化学计量学参数与动力学参数)的校正是仿真模拟过程中的关键步骤,采用软件提供的动力学参数和化学计量学参数的缺省值进行初步模拟,得到的出水COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP浓度分别为7.00、0.06、19.26和1.81 mg/L。根据初步模拟结果可知,模拟值与实测值的差别较大,为提高模型的准确性需调整相关参数。以常规灵敏度分析为基础,找出对出水水质影响最大的化学计量学参数和动力学参数^[21],最终筛选出7个对模拟结果有较大影响的参数,具体见表2。

表2 化学计量学参数与动力学参数的推荐值与调整值

Tab.2 Recommended and adjusted values of dynamics and stoichiometric parameters

| 项 目 | | | 缺省值 | 校正值 |
|---------|------------|--|-------|-------|
| 动力学参数 | 氨氧化菌(AOB) | 最大单位生长速率/ d^{-1} | 0.900 | 0.563 |
| | | 最大单位生长速率/ d^{-1} | 3.20 | 2.05 |
| | 普通异养菌(OHO) | 好氧衰减速率/ d^{-1} | 0.62 | 0.805 |
| | | 反硝化中 N_2 的产生菌 | 0.5 | 0.601 |
| 化学计量学参数 | 常规指标 | 内源呼吸残留物中磷含量/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ | 0.022 | 0.115 |
| | 普通异养菌(OHO) | 好氧产率系数 | 0.666 | 0.78 |
| | | 缺氧产率系数 | 0.54 | 0.59 |

从表2可以看出,化学计量学参数里面内源呼吸残留物中磷含量的校正值与缺省值相差较大,主要原因是在反应器运行初期,系统没有向外部排泥,导致反应器内的污泥处于内源呼吸期。

模型参数校正后,模拟出水的COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP浓度分别为9.09、0.38、18.10和0.51 mg/L,实测值与调整后模拟值的相对误差控制在10%以内,表明校正以后的模型能够较好地模拟中试装置的实际运行情况。因此,可以在此模型的基础上对改良 A^2/O —MBR工艺进行运行优化。

2.3 改良工艺的运行优化

利用校正后的模型对改良 A^2/O —MBR工艺的运行参数进行优化,考察硝化液回流比、缺氧混合液回流比、污泥回流比、污泥龄、好氧池溶解氧浓度和碳源投加量对出水水质的影响。

硝化液回流比对出水水质的影响如图7所示。可知,出水COD没有随硝化液回流比的增加出现较大的变化。出水TN浓度随硝化液回流比的升高而下降,当硝化液回流比为0时,出水TN浓度为18.56 mg/L;当硝化液回流比增大至400%时,出水TN浓度降至17.72 mg/L。由此可知,增大硝化液回流比后,脱氮效果将有所提高。出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP随着硝化液回流比的增加呈现增大的趋势,这是由于大量 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 回流,影响了除磷效果。综合考虑能耗和去除效果,硝化液回流比控制在200%为宜。

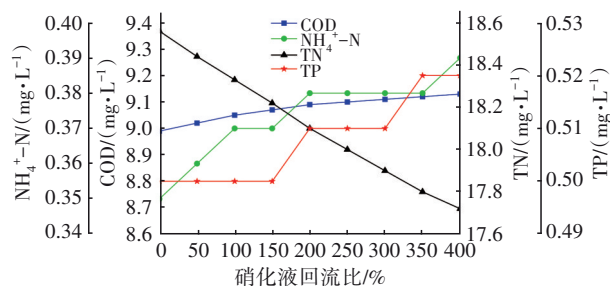


图7 硝化液回流比对出水水质的影响

Fig.7 Effect of nitrification liquid reflux ratio on effluent quality

为提高系统的脱氮效果,增加缺氧混合液的回流,模拟缺氧混合液回流比对出水水质的影响,结果见图8。可知,当缺氧混合液回流比由0增加至300%时,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和COD未发生明显变化。出水TN浓度随着缺氧混合液回流比的增加而下降,表明增加缺氧混合液的回流比对去除TN具有一定效果,这与试验结果相符合。出水TP浓度随缺氧混合液回流比的增加呈现先降后升的趋势,当缺氧混合液回流比为150%时,出水TP为0.49 mg/L。综合考虑能耗与总氮的去除效果,缺氧混合液回流比控制在150%为宜。

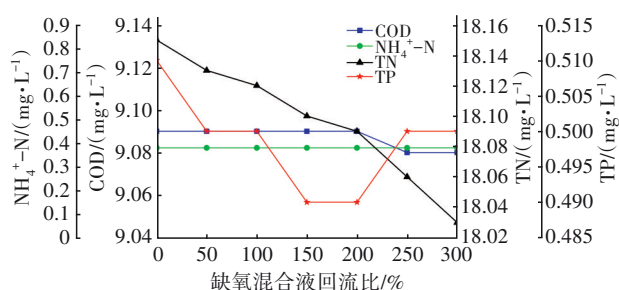


图8 缺氧混合液回流比对出水水质的影响

Fig.8 Effect of anoxic mixed liquid reflux ratio on effluent quality

污泥回流比对出水水质的影响如图9所示。可知,出水COD、NH₄⁺-N和TN浓度均随着污泥回流比的增加而下降。当污泥回流比为100%时,出水COD、NH₄⁺-N和TN浓度分别为9.08、0.38和18.03 mg/L,污泥回流比超过100%后变化很小。出水TP浓度随着污泥回流比的增加呈现先增后降的趋势,当污泥回流比为25%时,出水TP浓度达到最大值,为0.55 mg/L,污泥回流比增大至100%后出水TP浓度几乎不变。综合考虑能耗和去除效果,污泥回流比选择100%最为合适。

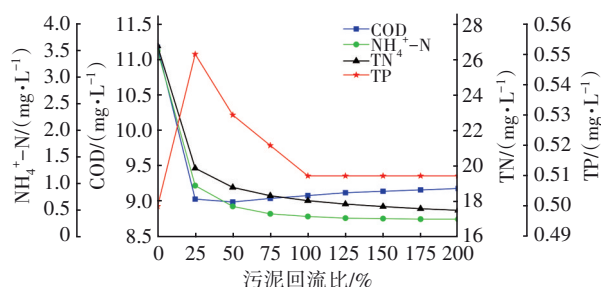


图9 污泥回流比对出水水质的影响

Fig.9 Effect of sludge reflux ratio on effluent quality

污泥龄对出水水质的影响如图10所示。

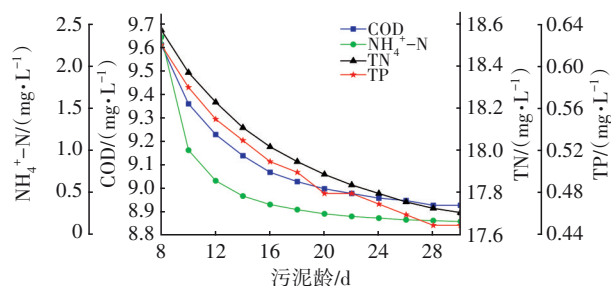


图10 污泥龄对出水水质的影响

Fig.10 Effect of sludge age on effluent quality

由图10可知,出水COD、NH₄⁺-N、TN和TP浓度均随着污泥龄的增加而下降。当污泥龄>20 d后,出水COD、NH₄⁺-N、TN和TP浓度的变化较小。但污泥

龄不能过长,否则污泥会发生老化现象,出现上浮,影响系统的运行效果。综合模拟结果和实际情况,污泥龄选择20 d较为合适。

好氧池溶解氧浓度对出水水质的影响如图11所示。可知,出水COD、NH₄⁺-N和TP浓度均随着好氧池溶解氧浓度的增加而下降。当好氧池溶解氧浓度为1.25 mg/L时,出水COD为9.00 mg/L,继续增加好氧池溶解氧浓度,出水COD保持不变,表明可降解有机物已经全部降解。出水TN浓度随着好氧池溶解氧浓度的增加而升高,好氧池溶解氧浓度不宜过高,否则会因硝化液回流将溶解氧带入缺氧池而影响反硝化脱氮效果。综合考虑能耗和去除效果,好氧池溶解氧浓度控制在1.25~1.75 mg/L为宜。

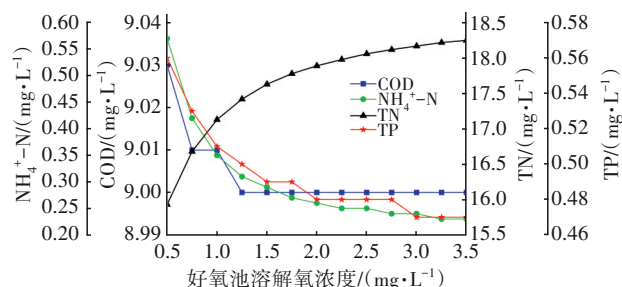


图11 好氧池溶解氧浓度对出水水质的影响

Fig.11 Effect of dissolved oxygen concentration in aerobic tank on effluent quality

从进水组分可知,水中碳源严重不足,会影响后期的脱氮效果。为提高系统的脱氮效果,向缺氧池中投加一定量的碳源(甲醇),其投加量对出水水质的影响如图12所示。

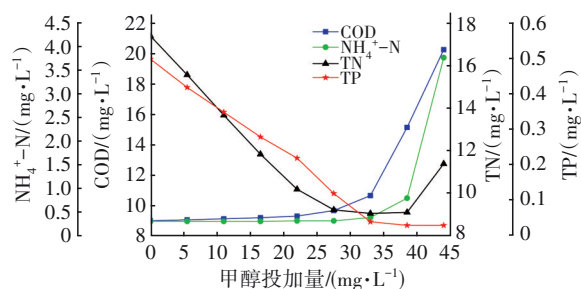


图12 甲醇投加量对出水水质的影响

Fig.12 Effect of methanol dosage on effluent quality

由图12可以看出,出水COD和NH₄⁺-N的浓度在甲醇投加量为33 mg/L之前变化较小,超过33 mg/L以后,COD和NH₄⁺-N浓度明显升高。碳源的加入对TN和TP的去除效果具有明显的促进作用,碳源的

引入,一方面为反硝化细菌提供能量,提高脱氮效果;另一方面能够为聚磷菌提供能量,使聚磷菌能更好地释放磷,提高除磷效果。综合考虑运行费用和污染物去除效果两方面,甲醇投加量为33 mg/L时较适宜。

3 结论

① 改良A²/O—MBR工艺对低碳源城镇污水中COD、NH₄⁺-N和SS的平均去除率分别为91.7%、98.5%和98.9%。硝化液回流比对COD、NH₄⁺-N和TP的去除效果影响不大,但对TN的去除有一定影响,在一定范围内,增大硝化液回流比,TN去除率有所提高。

② 将缺氧池一分为二,增大缺氧混合液的回流比,TN去除率提高了11.5%,TP去除率提高了12.2%。对于某些低碳源城镇污水的处理,在不改变原有结构的情况下,为了提高脱氮除磷效果,此方法是一种较优的选择。

③ 利用BioWin软件对改良A²/O—MBR工艺进行运行优化,优化结果表明,在硝化液回流比为200%、缺氧混合液回流比为150%、污泥回流比为100%、污泥龄为20 d、好氧池溶解氧浓度为1.25~1.75 mg/L、甲醇投加量为33 mg/L条件下,污染物去除效果最佳。

参考文献:

- [1] 付乐,李树苑,钱望新,等. 低碳源城市污水的强化脱氮除磷工艺研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(1): 26-29.
FU Le, LI Shuyuan, QIAN Wangxin, *et al.* Study on treatment of municipal wastewater with low carbon source by enhanced nitrogen and phosphorus removal process[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(1): 26-29 (in Chinese).
- [2] 杨胤,赵静,王田天,等. 体积比对改良A²/O同步脱氮除磷装置去除效果的影响[J]. 水处理技术, 2016, 42(4): 91-95.
YANG Yin, ZHAO Jing, WANG Tiantian, *et al.* Effect of volume ratio on simultaneous nitrogen and phosphorus removal effect in modified A²/O device[J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42(4): 91-95 (in Chinese).
- [3] 柯浪文,陈轩,周伟,等. 改良AAO工艺处理低浓度碳源废水的优化分析[J]. 贵州科学, 2020, 38(3):

83-86.

KE Langwen, CHEN Xuan, ZHOU Wei, *et al.* Optimization of treatment of low carbon source wastewater by improved AAO process [J]. Guizhou Science, 2020, 38(3): 83-86(in Chinese).

- [4] 王雪,黎柳记,戴仲怡. 前置调蓄池的改良型A²/O工艺半地下式大型污水厂设计[J]. 中国给水排水, 2021, 37(6): 86-90.

WANG Xue, LI Liuji, DAI Zhongyi. Design of semi-underground large-scale sewage treatment plant with improved A²/O process with pre-storage tank [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(6): 86-90 (in Chinese).

- [5] 李航,董立春,方建飞,等. 初沉池优化运行对改良型A²/O工艺脱氮除磷的影响[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(6): 1189-1195.

LI Hang, DONG Lichun, FANG Jianfei, *et al.* Effect of optimizing operation of primary sedimentation tank on nitrogen and phosphorus removal of modified A²/O process [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(6): 1189-1195(in Chinese).

- [6] 宫必祥,张刚,杨永进,等. A²O/MBR工艺处理城镇污水的中试研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32(23): 113-116.

GONG Bixiang, ZHANG Gang, YANG Yongjin, *et al.* Pilot study on municipal sewage treatment by A²O/MBR process [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(23): 113-116 (in Chinese).

- [7] 陈浩林,彭轶,安东,等. 基于BioWin软件对多级A/O工艺的运行优化[J]. 中国给水排水, 2020, 36(19): 60-66.

CHEN Haolin, PENY Yi, AN Dong, *et al.* Operation optimization of multi-stage A/O process based on BioWin software [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(19): 60-66 (in Chinese).

- [8] ELAWWAD A. Optimized biological nitrogen removal of high-strength ammonium wastewater by activated sludge modeling[J]. Journal of Water Reuse and Desalination, 2017, 8(3): 393-403.

- [9] GABARRÓN S, DALMAU M, PORRO J, *et al.* Optimization of full-scale membrane bioreactors for wastewater treatment through a model-based approach [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 267: 34-42.

- [10] 邵袁,王华成,覃榴滨,等. 乡镇污水处理厂仿真模拟及优化运行研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(9):

- 90–97.
- SHAO Yuan, WANG Huacheng, QIN Liubin, *et al.* Study on analogue simulation and optimized operation for township sewage treatment plant [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(9): 90–97 (in Chinese).
- [11] 罗凡, 李捷. 基于仿真模拟的污水处理厂提标改造方案[J]. *净水技术*, 2018, 37(5): 88–92.
- LUO Fan, LI Jie. Scheme of upgrading and reconstruction for WWTP based on analogue simulation [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(5): 88–92 (in Chinese).
- [12] 沈昌明, 王国华, 杨殿海, 等. 仿真模拟改良倒置A²/O工艺的优化运行策略[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(9): 12–15.
- SHEN Changming, WANG Guohua, YANG Dianhai, *et al.* Analog simulation of optimization operation strategy of modified inverted A²/O process [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(9): 12–15 (in Chinese).
- [13] SARKAR U, DASGUPTA D, BHATTACHARYA T, *et al.* Dynamic simulation of activated sludge based wastewater treatment processes: case studies with Titagarh Sewage Treatment Plant, India [J]. *Desalination*, 2010, 252(1/3): 120–126.
- [14] 王醒, 房婷婷, 丁彬彬, 等. BioWin仿真软件在污水处理中的应用研究[J]. *广东化工*, 2020, 47(3): 128–132.
- WANG Xing, FANG Tingting, DING Binbin, *et al.* Application research of BioWin software to sewage treatment [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2020, 47(3): 128–132 (in Chinese).
- [15] 金舒怡, 刘振鸿. 基于BioWin的改良A/A/O工艺模拟[J]. *广州化工*, 2013, 41(11): 187–189.
- JIN Shuyi, LIU Zhenhong. The simulation of modified A/A/O process based on BioWin [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2013, 41(11): 187–189 (in Chinese).
- [16] 马昭, 刘玉玲, 杨侃. 基于BioWin软件对A²/O工艺的模拟与优化[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(10): 4803–4810.
- MA Zhao, LIU Yuling, YANG Kan. Simulation and optimization of A²/O process based on BioWin software [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(10): 4803–4810 (in Chinese).
- [17] JI X Y, LIU Y Y, ZHANG J B, *et al.* Development of model simulation based on BioWin and dynamic analyses on advanced nitrate nitrogen removal in deep bed denitrification filter [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2019, 42(2): 199–212.
- [18] 冉治霖, 田文德, 相会强. 一种改良型A²/O工艺脱氮除磷的影响因素研究[J]. *环境工程*, 2018, 36(6): 63–67.
- RAN Zhilin, TIAN Wende, XIANG Huiqiang. Research on influence factors of nitrogen and phosphorus removal in bi-bio-selective simultaneous phosphorus and nitrogen (BBSPN) process [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(6): 63–67 (in Chinese).
- [19] TIAN J B, CHENG X, DENG S, *et al.* Inducing in situ crystallization of vivianite in a UCT-MBR system for enhanced removal and possible recovery of phosphorus from sewage [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(15): 9045–9053.
- [20] 曹海彬, 张代钧, 卢培利. 活性污泥模型进水COD组分的测定方法[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2005, 28(9): 87–91.
- CAO Haibin, ZHANG Daijun, LU Peili. Measurements of influent COD components for activated sludge models [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2005, 28(9): 87–91 (in Chinese).
- [21] LIWARSKA-BIZUKOJC E, BIERNACKI R. Identification of the most sensitive parameters in the activated sludge model implemented in BioWin software [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(19): 7278–7285.
-
- 作者简介: 何春求(1993–), 男, 江西鹰潭人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为水污染控制理论与技术。
- E-mail: 2534778332@qq.com
- 收稿日期: 2021-07-12
- 修回日期: 2021-08-06

(编辑: 任莹莹)