

齐晓丹,杨秀伟,刘俊良,等.三级 AO 生物接触氧化工艺处理农村生活污水试验[J].湖南科技大学学报(自然科学版), 2024,39(2):118-124.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.02.015

QI X D, YANG X W, LIU J L, et al. Experimental Study on Degradation of Rural Domestic Sewage by Tertiary AO Biological Contact Oxidation Process[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(2): 118-124.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.02.015

三级 AO 生物接触氧化工艺 处理农村生活污水试验

齐晓丹,杨秀伟,刘俊良*,李馨娜

(河北农业大学 城乡建设学院,河北 保定 071001)

摘要:为降低农村污水处理的运行成本,探究最适宜农村污水处理的最佳运行条件,采用三级 AO 生物接触氧化工艺处理农村生活污水,利用自然跌水的方式来补充溶解氧,并对跌水的影响因子进行试验研究.结果表明:在试验环境温度为 24~30 ℃,pH 为 7~8,溶解氧质量浓度为 3.0~3.5 mg/L,辅助曝气量为 500 L/h,最佳水力停留时间为 6 h 时,化学需氧量(COD)的平均去除率为 88.98%,氨氮的平均去除率为 83.56%,总磷的平均去除率为 77.78%,达到河北省《农村生活污水排放标准》(DB13/2171—2020)一级标准,并结合 Box-Behnken 响应曲面模型原理,得出三级生物接触氧化工艺的 COD 去除率模型学方程.

关键词:农村生活污水;接触氧化工艺;跌水曝气;三级反应器;响应曲面模型

中图分类号:X799.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2024)02-0118-07

Experimental Study on Degradation of Rural Domestic Sewage by Tertiary AO Biological Contact Oxidation Process

QI Xiaodan, YANG Xiuwei, LIU Junliang, LI Xinna

(College of Urban and Rural Construction, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

Abstract: In order to reduce the operating cost of rural wastewater treatment, the optimal operating conditions that are most suitable for rural wastewater treatment are investigated. The experiment uses three-stage AO contact oxidation process to treat rural domestic wastewater, and applies natural water fall to supplement dissolved oxygen, and the influence factors of water fall are studied experimentally. Results show that the average removal rate of COD is 88.98%, the average removal rate of ammonia nitrogen is 83.56% and the average removal rate of total phosphorus is 77.78% at the ambient temperature of 24~30 ℃, pH 7~8, dissolved oxygen is 3.0~3.5 mg/L, the auxiliary aeration is 500 L/h and the optimal hydraulic retention time is 6 h. The average COD removal rate of the three-stage biological contact oxidation process is derived by combining the Box-Behnken response surface model with the primary standard of the Hebei Province "Rural Village Domestic Sewage Discharge Standard" (DB13/2171—2020).

Keywords: rural domestic sewage; contact oxidation process; water drop aeration; three-stage reactor; response surface model

收稿日期:2021-05-19

基金项目:河北省水利科技计划资助项目(2020-55);河北农业大学理工基金资助项目(LG201632)

*通信作者, E-mail:762818029@qq.com

农村生活污水主要来源于冲厕、炊事、洗衣、洗浴以及清扫等生活行为产生的污水,存在难收集、污水处理设施投资大、处理效率低下、污水处理设施运行费用较高等问题^[1-4]。20世纪80年代末,我国开始从事农村生活污水处理的研究工作。近年来,越来越多的污水处理技术在农村得到应用和发展^[5-6]。江鹏^[7]结合传统A²/O工艺与生物接触氧化法,得到化学需氧量(COD),氨氮(NH₄⁺-N),总氮(TN),总磷(TP)的平均出水浓度(质量浓度,下同)分别为45.44, 2.52, 8.53, 0.42 mg/L,所得结果达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级标准的A标准;龙宇涵等^[8]采用2级AO-电解除磷工艺进行污水处理,结果表明,出水COD, NH₄⁺-N, TN, TP₀等污染物的去除率分别达到97.9%, 99.7%, 79.7%, 97.6%,均达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级标准的A标准,与传统活性污泥法相比,该工艺运行稳定,具有一定的抗冲击能力以及推广价值。

针对我国农村的污水收集处理难度大,经济成本高,简单处理后直接排入河道,对氨氮和总磷的去除效果不理想的问题^[9-13],本文对单级AO生物接触氧化工艺进行改进,设置三级AO接触氧化池,并将每级接触氧化池拆分成厌氧池和好氧池,通过厌氧与好氧环节的不断重复、交替运行以及在2个池体之间设计跌水充氧结构,可以增加氨氮和磷的去除效果,同时降低设施的运行费用。

1 试验材料与工艺

1.1 试验材料

由于居民生活习惯的不同,各地农村生活污水的污染程度以及污水的排放方式也不相同。试验污水取自河北省某村的生活污水,主要污染物COD,氨氮和TP的平均值分别为290~310 mg/L, 28~35 mg/L, 1.9~2.5 mg/L。

1.2 试验装置

试验采用跌水充氧的三级AO生物接触氧化工艺,处理的工艺流程如图1所示。试验污水经过一级、二级、三级这3个生物接触氧化反应器进行处理,最后经过沉淀池排放,每一个反应器都由厌氧池和好氧池组成,同时每一级反应器后设立排水口,便于进行对比检测。对于整个试验来说,每一级反应器也是一个独立的处理单元。试验研究的农村生活污水的检测指标主要包括COD,氨氮和TP。

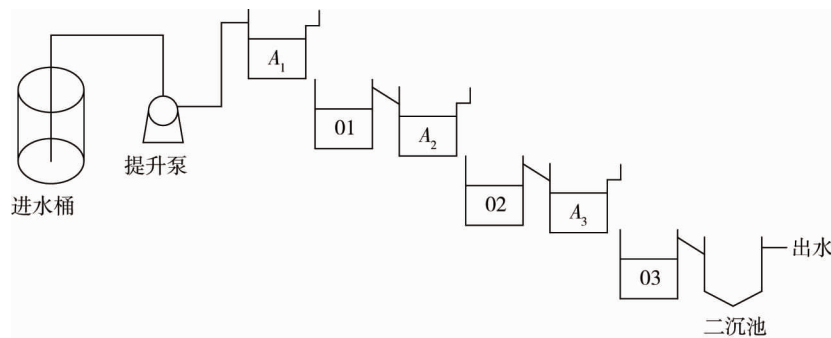


图1 处理工艺流程

试验装置选择并利用地势差和石块填补,使上一级好氧池与下一级厌氧池之间呈下降趋势,为了保持进水的平衡稳定,在装置的最前端设置一个进水桶,用提升泵将水提升至第一级反应器的厌氧池。厌氧池与好氧池之间采用自然跌水的方式来补充溶解氧,好氧池与厌氧池的池体结构相似,为长方体池体构造,池体尺寸为200 mm×200 mm×400 mm,在池体长2/3处设有隔板,池内填充填料,填料高为0.2 m。另外,池底有穿孔管曝气充氧装置,以便进行辅助曝气,试验污水通过重力自流到后续池体中,从而减少曝气泵的能耗,增加溶解氧^[14]。

1.3 试验方法

试验选择在室内进行,试验进行期间环境温度为24~30℃。首先采用自然挂膜法挂膜^[15],通过连续进

出水的方式进行模拟装置的启动,挂膜周期约为 25 d.在环境温度为 24~30 ℃,pH 为 7~8 的条件下,在室内进行模拟试验,依次改变模拟装置的跌水板高度,通过测定溶解氧浓度来确定最佳跌水高度.在最佳跌水高度的基础上,通过改变水力停留时间来考察模拟装置污染物的去除性能,得出在环境温度为 24~30 ℃,pH 为 7~8,溶解氧浓度为 3.0~3.5 mg/L,辅助曝气量为 500 L/h 时的最佳水力停留时间,并且利用 Box-Behnken 响应曲面模型进行试验装置的优化,得出最优工况.

2 试验结果分析

2.1 不同跌水高度跌水充氧效果分析

试验用水与空气的接触面积越大,所含的溶解氧越多,因此结合试验需求,采用竖缝间距 4 cm,缝宽 3 cm 的跌水挡板向一级反应器内通入清水.保持进水流量不变,用便捷式溶氧仪测定溶解氧的含量进而确定跌水高度.相关资料表明:当跌水板的高度设置为 0.5~0.7 m 时,其流量增大,跌水充氧的效果显著^[16].试验设置的跌水高度分别为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 m,将其中一个溶氧仪放在跌水前的位置,另一个溶氧仪放在不同跌水高度处进行测量,得到溶解氧浓度,试验共 5 组,所得结果如图 2 所示.

由图 2 可知:随着跌水板高度的增加,溶解氧浓度也随之增加.这是由于设置的跌水板越高,与空气接触的时间增长,水中的溶解氧逐渐增加,当跌水板的高度达到 0.5 m 时,溶解氧浓度为 2.935 mg/L,跌水前后溶解氧浓度的差值为 1.1 mg/L,有效地增加了溶解氧浓度.考虑试验工艺的安全与维护管理,试验选用跌水板的高度为 0.5 m.

2.2 不同水力停留时间的处理效果分析

耗能是农村生活污水处理技术发展的关键制约因素之一,不同的水力停留时间对处理农村生活污水的节能效果影响的差异较大,因此,设计不同水力停留时间的农村污水处理试验.试验运行条件:COD 浓度为 300~350 mg/L,试验环境温度为 24~30 ℃,溶解氧浓度为 3.0~3.5 mg/L,pH 为 7~8,辅助曝气量为 500 L/h,厌氧与好氧交替进行,实现混合液回流的目的,设置水力停留时间分别为 1, 3, 5, 6, 7, 9 h,得到不同水力停留时间的 COD 的去除效果如图 3 所示.

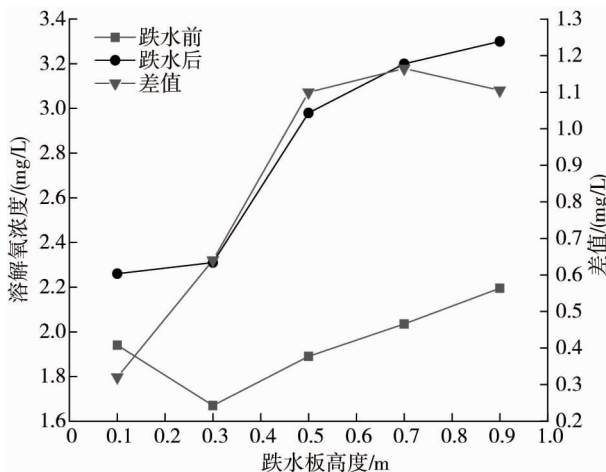


图 2 不同高度的溶解氧浓度

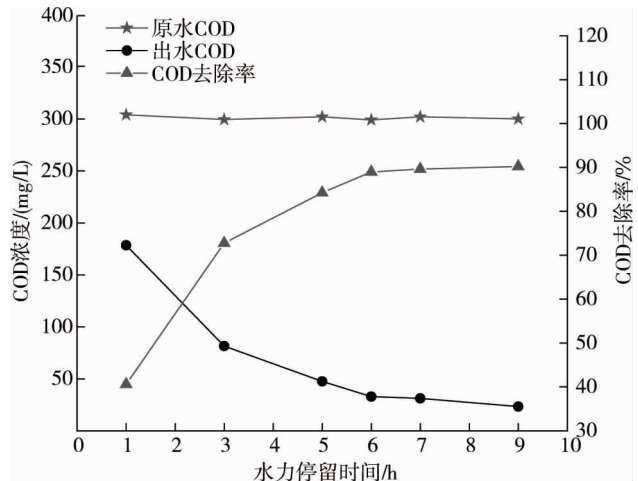


图 3 不同水力停留时间 COD 的去除效果

由图 3 可知:COD 的去除率随着水力停留时间的增加整体呈先迅速增加,后增加趋势变缓直至不变.这是由于水力停留的时间越长,污水与生物膜接触的时间越长,生物膜上的微生物会吸附水体中的污染物,达到去除污水中污染物的目的^[17].在好氧阶段,好氧菌利用污水中的有机物生长繁殖,达到降低 COD 的目的;在厌氧段,由厌氧菌的生长繁殖与反硝化菌的反硝化作用实现污水的净化,从而达到去除部分有机物的目的^[18].当水力停留时间达到 6 h 后,由于进水 COD 不变,在有机负荷不改变的情况下,生物膜上的微生物菌群对污水中有机物质的利用已接近最大值.在水力停留时间超过 6 h 后,COD 的去

除率未见明显变化,甚至可能会出现下降趋势,这是因为水力停留时间过长后,有机负荷过低,加重了微生物的内源呼吸作用,导致微生物的生长状态较差,COD 的去除达不到预期效果^[19].在水力停留时间为 6 h 时,出水 COD 的浓度为 33.06 mg/L,去除率逐渐稳定在 88.98%左右,达到了河北省《农村生活污水排放标准》(DB13/2171—2020)一级标准.试验测得的数据与张吉库等^[20]使用 A²/O 处理农村污水所得到的 COD 去除率为 89.06%接近,但是本试验的水力停留时间较小且不需要考虑污泥回流,极大地节省了处理成本.

不同水力停留时间的氨氮去除效果如图 4 所示.由图 4 可知:在水力停留时间较短时,氨氮的去除率随着水力停留时间的增加整体上呈先迅速增加,后缓慢下降的趋势.当水力停留时间为 6 h 时,氨氮浓度为 4.93 mg/L,去除率为 83.56%,处理效果最佳,达到河北省《农村生活污水排放标准》(DB13/2171—2020)一级标准.分析原因可能是因为氨氮的去除主要依赖硝化与反硝化作用,当水力停留时间较长时,微生物繁殖代谢残留在模拟装置中,对硝化细菌造成抑制,同时,进水流量变小导致碳源减小,也限制了反硝化细菌的新陈代谢,最终导致氨氮去除率的下降^[21].另外,结合 COD 的去除情况来看,在水力停留时间为 7~9 h 时,COD 的去除率较高,碳源的减小导致碳氮比的降低,碳氮比的减小也是影响氨氮去除率的一个重要因素.

不同水力停留时间的总磷的去除效果如图 5 所示.由图 5 可知:总磷的去除率随着水力停留时间的增加呈先迅速增加,后增加趋势变缓直至不变.由于模拟装置磷的去除主要依靠微生物的新陈代谢吸收磷元素,磷主要是来源于污水中携带的外源磷以及在缺氧环境下部分细菌将菌体内的 ATP 水解出内源磷,外源磷和内源磷的共同输入使装置的除磷达到平衡状态^[22],当水力停留时间较长时,装置中的磷足以维持聚磷菌等微生物的新陈代谢,当水力停留时间较短时,外源磷的输入增加,反应器中的磷含量少于微生物新陈代谢所需要的磷含量,最终导致 TP 的出水浓度变大,去除率减小.

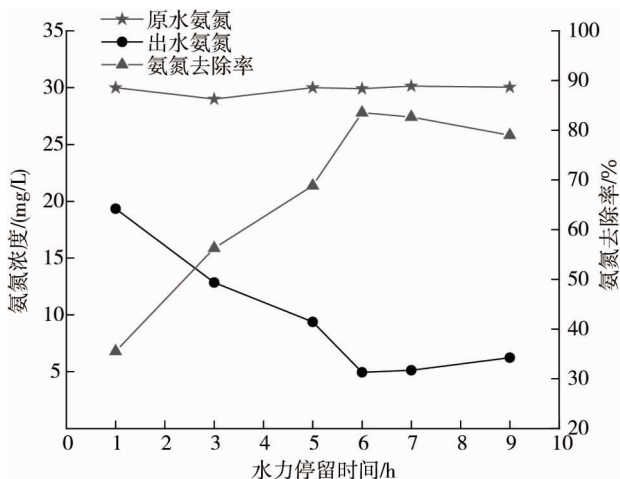


图 4 不同水力停留时间氨氮的去除效果

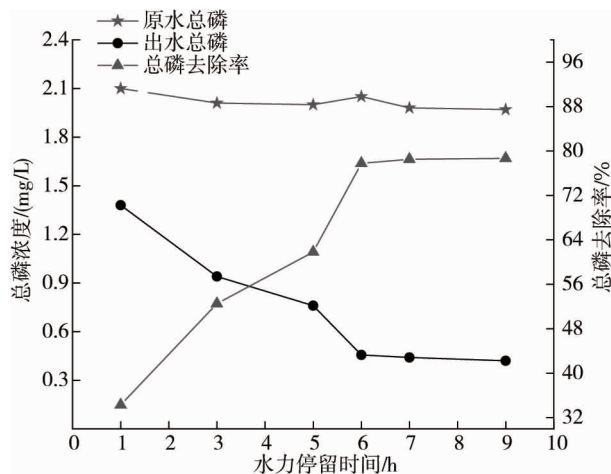


图 5 不同水力停留时间总磷的去除效果

当水力停留时间为 6 h 时,TP 的去除率为 77.78%,出水 TP 的浓度为 0.46 mg/L,达到了河北省《农村生活污水排放标准》(DB13/2171—2020)一级标准.生物除磷的过程即聚磷菌在厌氧环境下释磷,在好氧环境中过量吸磷以达到除磷的目的,三级 AO 接触氧化工艺中,好氧厌氧的多次交替环境为聚磷菌的吸磷和释磷提供了良好的条件.

综合考虑试验装置的运营成本以及处理效能,选择 6 h 为最佳水力停留时间,当水力停留时间为 6 h 时,各级反应器的 COD,氨氮和 TP 的去除效果分别如图 6~图 8 所示.

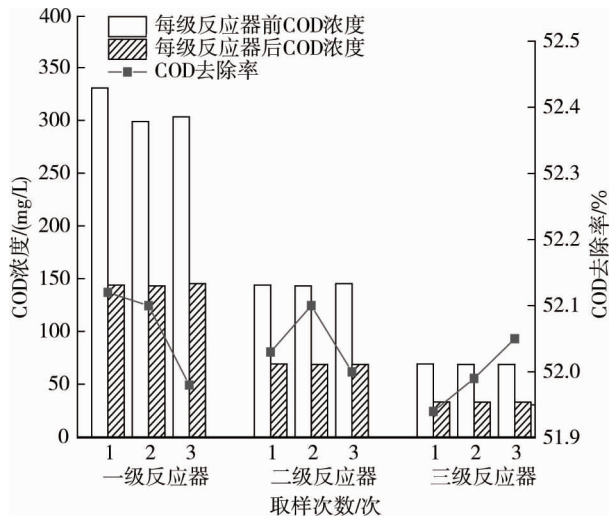


图6 水力停留时间为6h时各级反应器COD的去除效果

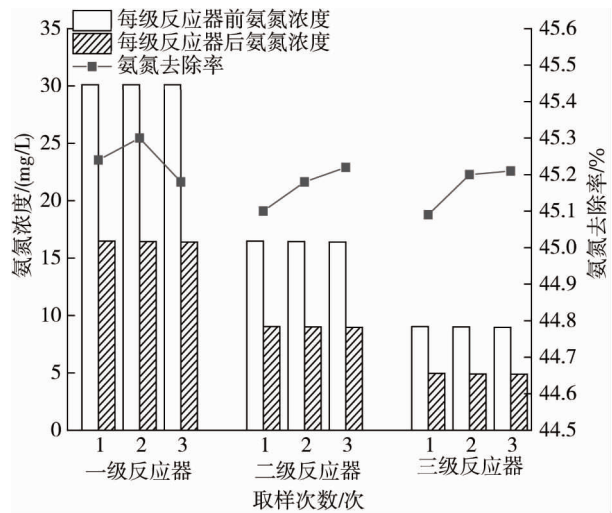


图7 水力停留时间为6h时各级反应器氨氮的去除效果

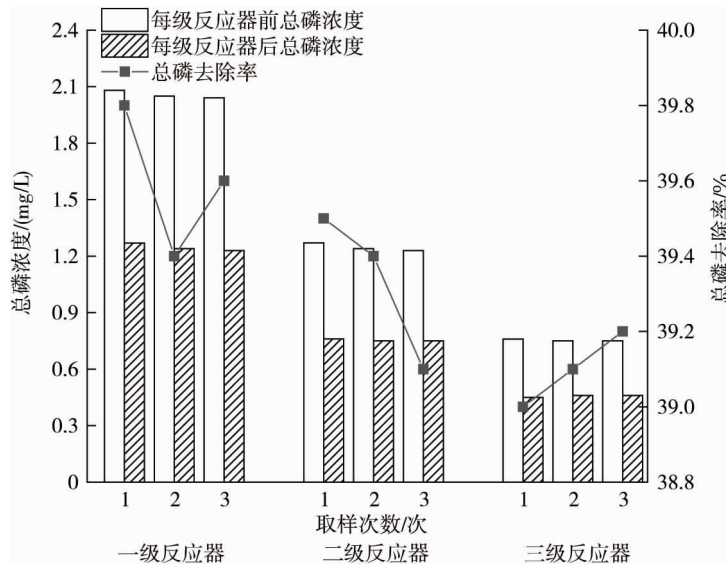


图8 水力停留时间为6h时各级反应器TP的去除效果

由图6~图8可知:当水力停留时间为6h时,各级反应器的COD,氨氮和TP的去除率分别为51.97%~52.13%,45.10%~45.29%,39.00%~39.80%。这是由于三级反应器在相同的环境条件下独立挂膜,微生物基本保持不变,因此,三级反应器污染物的去除率在一定误差允许的范围内一致。试验结果表明:污水经过三级反应器处理后,能有效地去除污水中的污染物,达到了河北省《农村生活污水排放标准》(DB13/2171—2020)一级标准。

3 模型方程的建立

为了探讨三级AO生物接触氧化工艺处理农村生活污水参数的相互作用关系,依据Box-Behnken响应曲面模型设计原理,拟合模型方程^[23-24]。基于课题组前期的试验结果,以曝气量、水力停留时间、有机负荷为因素,以COD去除率作为响应值,应用Design-expert V8.0软件设计试验,得出COD去除率的模型方程。试验考察的因素有3个,分别为水力停留时间5~7h,曝气量400~600L/h和有机负荷100~300mg/L,水平由小到大分别取-1,0,1,运行所得的试验结果如表1所示,共计12组试验。

表1 Box-Behnken 响应曲面模型试验方案与结果

试验号	水力停留时间/h	曝气量/(L/h)	有机负荷/(mg/L)	COD 去除率/%
1	7	500	300	89.01
2	5	500	300	87.95
3	7	500	100	72.25
4	6	400	300	88.23
5	6	600	100	71.68
6	5	400	200	81.35
7	7	600	200	82.65
8	6	600	300	88.98
9	6	400	100	70.99
10	5	600	200	81.78
11	7	400	200	82.11
12	5	500	100	70.41

应用 Design-expert V8.0 软件设计最小二乘法对数据进行多元线性回归分析,得出 COD 的去除率模型方程为 $R = 79.67 + 0.539A - 7.667B + 8.590C + 0.055AB - 0.195AC + 0.030BC + 2.003A^2 + 8.270B^2$ (A 为水力停留时间, B 为曝气量, C 为有机负荷),表明 3 个因素之间的相互作用.其中模型的 P 值 $< 0.000 1$,模型决定系数 $R^2 = 0.999 6$,表明模拟装置的 COD 去除率的实际值与预测值之间具有较好的拟合度,模型显著,变异系数 CV 为 0.17%,表明试验的精确度与可信度高.COD 的去除率模型方程表明该模型对 COD 去除率的影响非常显著,拟合性能良好.拟合结果显示:当水力停留时间为 7 h,曝气量为 500 L/h,有机负荷为 300 mg/L 时,COD 的去除率达到最大,为 89.01%.综合考虑模拟装置的实际运行成本以及各污染物的处理效果,在试验环境温度为 24~30 ℃,pH 为 7~8,溶解氧浓度为 3.0~3.5 mg/L,水力停留时间为 6 h,曝气量为 500 L/h,有机负荷为 300 mg/L 时为最优工况,此时 COD 的平均去除率为 88.98%.

4 结论

1) 试验确定跌水板的高度 0.5 m 时,采用跌水进行复氧,增加氧传递效率,减少曝气量,可以有效地降低农村污水处理的运行成本,为微生物降解污水提供足够的溶解氧,极大地去除污染物,减少剩余污泥的产生.

2) 在试验环境温度为 24~30 ℃,溶解氧浓度为 3.0~3.5 mg/L,辅助曝气量为 500 L/h,最佳水力停留时间为 6 h 时,出水 COD 浓度为 33.06 mg/L,出水 TP 浓度为 0.46 mg/L,出水 COD 浓度为 4.93 mg/L,COD 每级反应器的平均去除率为 51.98%,氨氮每级反应器的平均去除率为 45.18%,TP 每级反应器的平均去除率为 39.40%,达到了河北省《农村生活污水排放标准》(DB13/2171—2020)一级标准.

3) 三级生物接触氧化工艺 COD 去除率的模型方程为 $R = 79.67 + 0.539A - 7.667B + 8.590C + 0.055AB - 0.195AC + 0.030BC + 2.003A^2 + 8.270B^2$.根据运行结果,综合考虑模拟装置的实际运行成本以及各污染物的处理效果,在试验环境温度为 24~30 ℃,pH 为 7~8,溶解氧浓度为 3.0~3.5 mg/L 时,水力停留时间为 6 h,曝气量为 500 L/h,有机负荷为 300 mg/L 时为最优工况,此时 COD 的平均去除率为 88.98%.

4) 该工艺对不同地区具有不同的应用模式,应用该工艺处理农村生活污水时,需要结合当地的实际情况灵活处理,若农村地区的污水污染程度较轻或排放标准低时,可以考虑二级甚至一级生物接触氧化工艺,使其达到排放标准.该工艺对不同水质的农村生活污水的处理具有参考价值.

参考文献:

- [1] 张体强,廖欣.我国农村污水处理现状综述[J].环境与发展,2019,31(10):241-243.

- [2] 周浩,卢楠,邹家乐,等.农村生活污水收集模式及污水处理现状分析[J].净水技术,2021,40(8):90-96.
- [3] 许文卿.我国农村生活污水处理现状与推进对策[J].环境与发展,2019,31(8):198-199.
- [4] 何安吉,黄勇.农村生活污水处理技术研究进展及改进设想[J].环境科技,2010,23(3):68-71,75.
- [5] 张曼雪,邓玉,倪福全.农村生活污水处理技术研究进展[J].水处理技术,2017,43(6):5-10.
- [6] 王俊能,赵学涛,蔡楠,等.我国农村生活污水污染排放及环境治理效率[J].环境科学研究,2020,33(12):2665-2674.
- [7] 江鹏.A²/O生物接触反应器处理生活污水生产性试验研究[D].长沙:湖南大学,2019.
- [8] 龙宇涵,刘东方,田雨,等.2级AO-电解除磷组合工艺处理农村生活污水[J].水处理技术,2021,47(4):96-100.
- [9] 刘君,邱敬贤,邓刚.农村生活污水处理技术探讨[J].中国环保产业,2018(10):48-51.
- [10] 李昀婷,石玉敏,王俭.农村生活污水一体化处理技术研究进展[J].环境工程技术学报,2021,11(3):499-506.
- [11] 余淦申.生物接触氧化处理废水技术[M].北京:中国环境科学出版社,1991.
- [12] SHENG X L, QIU S K, XU F, et al. Management of rural domestic wastewater in a city of Yangtze delta region: performance and remaining challenges[J]. Bioresource Technology Reports, 2020, 11: 100507.
- [13] 邵楠.农村生活污水处理工艺的相关研究[J].中国资源综合利用,2018,36(12):35-37.
- [14] 朱玉芳,朱彤,GROETZBACH M,等.溶解氧浓度对多级接触氧化系统的影响研究[J].节能,2018,37(2):72-75.
- [15] 崔鹏,彭永臻,曾立云,等.A/O生物接触氧化反应器的挂膜与启动[J].中国给水排水,2016,32(9):25-29.
- [16] 衣青,李静,马传军,等.跌水曝气浅层生物接触氧化工艺的研究[J].环境保护与循环经济,2010,30(9):59-60.
- [17] 聂发辉,黄敏峰,鲁秀国,等.生物接触氧化-潜流型人工湿地组合工艺处理农村生活污水的试验研究[J].应用化工,2018,47(10):2162-2164.
- [18] HANG Q Y, WANG H Y, HE Z, et al. Hydrilla verticillata-sulfur-based heterotrophic and autotrophic denitrification process for nitrate-rich agricultural runoff treatment[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(5): 1574.
- [19] 李贵亮,鄂正阳,张赞萍,等.A/O生物接触氧化处理农村生活污水研究[J].能源与环保,2020,42(8):50-54.
- [20] 张吉库,孙冕.空气提升式A²/O处理农村生活污水[J].环境工程,2021,39(1):18-23.
- [21] 张炯杰.溶解氧、水力停留时间对硝化作用的影响研究报告[J].环境与发展,2017,29(7):131,134.
- [22] 傅金祥,陈正洋,罗迪,等.水力停留时间对SBR工艺处理低磷污水的影响[J].工业用水与废水,2020,51(4):21-24.
- [23] 李娟红,吕锡武.响应曲面优化跌水生物转盘去除氨氮的研究[J].水处理技术,2017,43(11):41-44.
- [24] 张大鹏,宋乐平,李本玉.多级串联接触氧化法处理漂染废水[J].给水排水,2004,30(8):52-55.