

污水处理与回用

厉林聪, 吴益辉, 党勇杰, 等. 改性聚氨酯填料在曝气生物滤池中的应用[J]. 净水技术, 2022, 41(3): 63-67, 78.

LI L C, WU Y H, DANG Y J, et al. Application of modified polyurethane filler in biological aerated filter[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(3): 63-67, 78.



扫我试试?

改性聚氨酯填料在曝气生物滤池中的应用

厉林聪¹, 吴益辉^{2,*}, 党勇杰¹, 吴 凯¹, 张淼佳¹, GEORGE Lu²

(1. 杭州余杭城西净水有限公司, 浙江杭州 311100; 2. 浙江海牛环境科技股份有限公司, 浙江杭州 311100)

摘 要 填料作为曝气生物滤池(BAF)的核心组成部分, 直接影响 BAF 的运行特性和效果。通过开展 BAF 深度处理中试, 采用改性聚氨酯填料(MPF)和陶粒填料对比试验, 探索 MPF 曝气生物滤池在硝化、反硝化过程中的主要影响因素。试验结果表明: 采用 MPF 的 BAF, 硝化和反硝化的最佳水力停留时间(HRT)都为 30 min; 一定 HRT 范围内, 除 SS 指标外, 以 MPF 为载体的 BAF 具有更高的污染物去除效果; 反硝化效果最佳 C/N 为 4.5, 最佳反洗周期为 4~5 d, 而硝化阶段最佳反洗周期为 6~8 d。综上, 在处理量相同的试验条件下, 采用 MPF 比陶粒, BAF 处理效率更高、反洗频次更少、节能降耗更明显, 具有更显著的应用价值。

关键词 改性聚氨酯填料(MPF) 曝气生物滤池 水力停留时间(HRT) C/N 反冲洗周期

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)03-0063-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.03.009

Application of Modified Polyurethane Filler in Biological Aerated Filter

LI Lincong¹, WU Yihui^{2,*}, DANG Yongjie¹, WU Kai¹, ZHANG Miaojia¹, GEORGE Lu²

(1. Hangzhou Yuhang Water Holding Group Co., Ltd., Hangzhou 311100, China;

2. Zhejiang HighNew Environmental Technology Co., Ltd., Hangzhou 311100, China)

Abstract As the key component of biological aerated filter (BAF), filters directly affect the operation characteristics and effect of BAF. The main influencing factors in the process of nitrification and denitrification of MPF biological aerated filter (BAF) were explored by carrying out the pilot test of advanced treatment of BAF and using the comparison test of modified polyurethane filler (MPF) and ceramic filler BAF. Results showed that the best HRT of nitrification and denitrification in BAF filled by MPF was 30 minutes. In a certain range of HRT, except SS, BAF filled by MPF had higher pollutant removal efficiency than that of ceramsite filter. The best denitrification effect of C/N ratio was 4.5, and the best backwashing cycle was 4~5 days in BAF filled by MPF, while the best denitrification of backwashing cycle was 6~8 days in BAF filled by MPF. In conclusion, BAF filled by MPF has higher treatment efficiency, less backwash frequency, more obvious energy saving and consumption reduction than ceramsite BAF under the same treatment capacity test conditions. And it has more significant application value.

Keywords modified polyurethane filler (MPF) biological aerated filter (BAF) hydraulic retention time (HRT) ratio of carbon/nitrogen (C/N) backwash cycle

[收稿日期] 2021-05-25

[作者简介] 厉林聪(1986—), 男, 主要从事污水处理方面的工作, E-mail: 15267126351@163.com。

[通信作者] 吴益辉(1993—), 男, 主要从事污水处理方面的工作, E-mail: 1015372617@qq.com。

曝气生物滤池(biological aerated filter, BAF)是一种较常见的污水处理工艺, 通常被应用于污水生物处理和微污染水源预处理^[1-3]。该工艺兼具生物

膜法和过滤单元的优点,系统内填料除了作为吸附和降解污染物微生物的载体外,还可以起到过滤拦截的作用,从而达到净化污水的目的^[4-5],因此,在全世界城市污水处理中得到了广泛的推广与应用^[6]。传统的 BAF 多采用陶粒作为填料载体,传统陶粒填料价格较低,但比表面积小、微生物挂膜量少且附着能力不强,因此,对污染物的去除效率较低^[7]。同时,随着使用年限的延长,陶粒填料容易局部板结,造成水质处理效果不理想、堵塞情况严重、反洗频次增加、处理能力降低等影响^[8],最终只能通过清池更换填料解决。随着对 BAF 研究和应用的增多,多数学者认为 BAF 工艺中生物填料性能是影响其处理效果的关键^[9-11]。因此,对新型填料性能的研究和筛选已经成为该领域的热点,如纳米改性陶粒填料、复合生物填料^[12]、发泡聚丙烯填料等,但这些填料均无法同时兼顾处理效果与填料的堵塞问题。改性聚氨酯填料(modified polyurethane filler, MPF)可满足曝气生物滤池的水质处理效果,同时在其处理效率、堵塞情况等方面也表现优异^[13-14],成为 BAF 应用填料重要的备选种类之一。目前,在 BAF 中关于 MPF 的研究大多处于实验室

水平,而缺少中试规模的相关研究成果,一定程度上限制了 MPF 在 BAF 工艺上的应用。

本文通过 2 套并行的中试设备,分别采用 MPF 和传统陶粒填料的 BAF 对比,在市政污水深度处理领域的处理效果及主要的影响因素,为采用 MPF 的 BAF 的工程设计和运行参数[水力停留时间(HRT)、外加碳源量及反洗周期]提供技术支撑。

1 试验材料和方法

1.1 试验水质和碳源

为了让所得试验结果能充分服务于后续 BAF 工程应用,试验用水直接取自某污水处理厂二沉池出水,试验期间水质情况如下:pH 值为 6.80~7.30, COD_{Cr}、氨氮、TN、TP、SS 含量分别为 14.00~32.00、2.50~9.80、8.20~14.30、0.10~0.31、18.00~32.00 mg/L。

试验所用碳源为 25% 的乙酸钠溶液, COD_{Cr} 含量为 21 万 mg/L。

1.2 填料特性

试验组和对照组采用的填料分别为 MPF 和普通陶粒填料,2 种填料的规格及性能参数如表 1 所示。

表 1 MPF 和陶粒填料参数
Tab. 1 Material Parameters of Modified Polyurethane Filter and Ceramic Material Filler

填料名称	规格/mm	孔隙率	比表面积/(m ² ·m ⁻³)	密度/(g·cm ⁻³)	丝径/mm
MPF-I	30×30×30	96%	10 000	0.95	1.20
MPF-II	30×30×30	80%	5 000	0.98	0.80
陶粒填料	4.0(粒径)	55%	5.5	2.1	/

试验组所采用的 MPE-I 及 MPE-II 填料实物如图 1 所示。

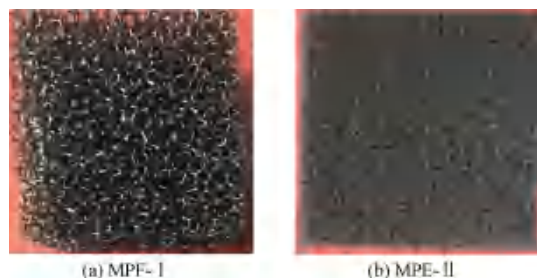
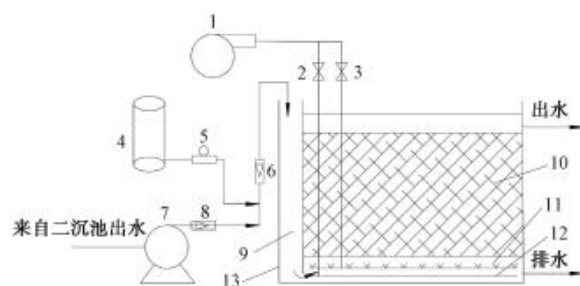


图 1 填料实物

Fig. 1 Packing Material

1.3 试验装置

试验组和对照组的中试试验装置如图 2 所示。



注:1—鼓风机;2—反洗阀门;3—曝气阀门;4—碳源罐;5—计量泵;6—流量计(碳源);7—进水泵;8—流量计(进水);9—进水管;10—填料;11—曝气管;12—反冲洗管;13—箱体

图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Experimental Device

装置主体尺寸为 $L \times W \times H = 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.35 \text{ m}$, 池

内由下至上分别设有反冲洗气管、曝气管、填料区等,其中,底部布水区层高为 0.4 m,滤料层高为 0.45 m,清水区层高为 0.3 m,超高为 0.2 m。试验组滤料层

设有上、中、下 3 层,分别由滤网及固定件对其进行分层固定,而对照组填料直接填充于滤料层。2 套试验装置的滤料层特性如表 2 所示。

表 2 试验装置滤料层特性
Tab. 2 Characteristics of Filter Material Layer in Experimental Device

对象	纵向分层	填料层高度/m	填料种类	备注
试验组	下层	0.15	MPF-I	填料填充率为 80%,运行时填料处于流化状态
	中间层	0.20	MPF-I	填充率为 100%
	上层	0.10	MPF-II	填充率为 100%
对照组	无分层	0.45	陶粒	填充率为 100%

1.4 试验方法

试验分为硝化、反硝化 BAF 这 2 种运行方式。硝化试验不外加药剂,主要对比不同 HRT 下,分别采用 MPF 和陶粒时 BAF 对氨氮、 COD_{Cr} 和 SS 的去除效果,同时对比 2 种 BAF 的反冲洗周期。反硝化试验阶段需外加乙酸钠溶液作为碳源,主要对比 2 种 BAF 在不同 HRT、C/N 条件下对 TN 和 SS 的去除效果,也对其反冲洗周期进行对比。

2 套 BAF 试验装置的处理水量为 $3 \text{ m}^3/\text{h}$,对应的 HRT 为 20 min,整个试验过程通过控制不同进水量获得不同的试验所需 HRT。在研究不同 HRT 对反硝化 BAF 去除 TN 效果的影响时,为排除进水碳源不足的干扰,该阶段的进水 C/N 设定为 7;而在研究不同进水 C/N 对 TN 去除效果的影响时,为确保反应时间充分,结合 HRT 结果确定该试验期间的 HRT 为 40 min,其外加碳源量则根据试验设定的 C/N 进行计算获得。

研究不同 HRT、进水 C/N 条件下的运行效果时,每种工况稳定运行 10 d,水质取样频率为 2 次/d;而研究滤池反冲洗周期试验时,每种工况至少稳定保持 30 d。每次改变试验工况后,通过检测 BAF 出水确保效果稳定运行 1 d 后视为该工况运行稳定。

1.5 水质测试方法

水质测定方法大部分选用《水和废水监测分析方法》^[15] 中的标准方法,部分指标选用仪器测定。具体测定方法如表 3 所示。

2 结果与讨论

2.1 HRT 影响对比

在同一进水条件下,MPF 曝气生物滤池和陶粒生物滤池在不同 HRT 下的硝化、反硝化处理效果如

表 3 测定分析方法
Tab. 3 Determination and Analysis Methods

水质指标	检测方法	检测仪器
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	UV-1000 紫外可见分光光度计
氨氮	纳氏试剂分光光度法	UV-1000 紫外可见分光光度计
COD_{Cr}	重铬酸盐指数法	滴定装置
SS	仪器测定	EF-3H 型悬浮物测定仪

图 3 所示。

由图 3(a) 可知,硝化 BAF 试验组与对照组对于 COD_{Cr} 和氨氮的最终去除率基本相同,但试验组所需的 HRT 较短。如试验组 HRT 在 30 min 时, COD_{Cr} 和氨氮的去除率就不再随着 HRT 增加而增加,而对照组所对应的时间为 35 min,这表明达到同样的去除率,试验组比对照组所需 HRT 短。

由图 3(b) 可知,当 HRT 大于 30 min 后,试验组 TN 的去除率不再变化,可达到 75%,而对照组在 HRT 为 35 min 时,TN 去除率才达到平衡。这说明当 HRT 小于 35 min 时,MPF 填料 BAF 试验组反硝化处理效果优于陶粒填料 BAF 对照组。

试验结果表明,在获得相同处理效果的前提下,以 MPF 为载体的 BAF 所需 HRT 明显小于陶粒 BAF,意味着同样体积的 BAF 处理能力更大,其原因应该是 MPF 的比表面积远大于陶粒滤料,故在池容相同的情况下,试验组 MPF 表面的挂膜量会多于对照组陶粒填料,即单位体积的生物量较大,可以在较短时间内完成对污染物的吸附和降解。因此,在一定的 HRT 范围内,2 种 BAF 对污染物的去除效率有较大的差别。随着 HRT 增加,生物量不再是限制

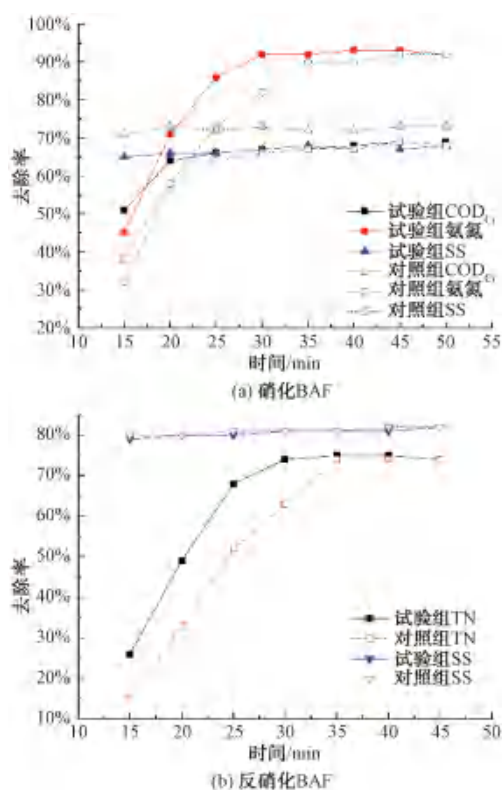


图3 HRT对不同生物滤池处理效果的影响

Fig. 3 Treatment Effect of HRT on Different Biofilters

因素,较少生物量在足够HRT的条件下,也能实现对污染物的吸附和降解,使得2种BAF对污染物的去除效率相近。此外,由于试验组BAF采用MPF,其内部通道结构多且杂乱,且下层填料呈流化状态,对池内气、水有很好的切割效果,增加了气、水、微生物膜的接触时间和接触频率,也一定程度上提高了微生物对 COD_{Cr} 、氨氮及TN的去除效率。

一般来说,BAF对SS的去除以过滤为主,因此,在一定过滤速度范围内(与HRT相关,HRT越大,则过滤速度越小),BAF对SS去除效率差别不大,图3的试验结果也表明此结论。MPF因比重小、空隙率大,硝化BAF曝气气流的影响大于陶粒填料。因此,采用陶粒填料下硝化BAF对SS的去除率(70%左右)高于MPF硝化BAF(65%左右)。而对于没有曝气的反硝化BAF,采用2种填料下BAF对SS的去除率都达到80%左右,这说明没有气流的影响后,在试验所采用的HRT范围内,水流对滤料层的搅动影响较小,故2种填料的BAF对SS去除率基本相同。可以预测,当HRT足够小,滤速超过一定值后,MPF会首先受到影响,对SS的去除

率会降低,但从试验结果看,当HRT小于25 min后,2种填料的BAF不足以实现对污染物的去除。

当HRT为30 min时,MPF的氨氮容积负荷分别为 $0.256 \text{ kg 氨氮}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,而陶粒填料容积负荷为 $0.228 \text{ kg 氨氮}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$;当HRT为25 min时,MPF的TN容积负荷分别为 $0.408 \text{ kg TN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,而陶粒填料的TN容积负荷分别为 $0.297 \text{ kg TN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。当HRT为30 min时,陶粒填料的TN容积负荷为 $0.387 \text{ kg TN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,接近MPF的TN容积负荷(HRT为25 min),可知MPF的处理负荷较陶粒填料高。参照设计规范的处理负荷,其氨氮处理负荷为 $0.6 \sim 1.0 \text{ kg 氨氮}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,TN容积负荷为 $0.8 \sim 1.2 \text{ kg TN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,李露等^[16]指出在HRT为24 min时,氨氮容积负荷小于 $0.7 \text{ kg 氨氮}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。分析试验的容积负荷低于设计规范及李露等的试验结果,原因是试验所取水样为二沉池出水,其水质浓度较低,故所得处理负荷低于设计规范负荷及李露等所得的容积负荷。

2.2 C/N对比

2种曝气生物滤池在不同C/N情况下,反硝化去除TN的效果对比如图4所示。当HRT为40 min时,改变进水C/N,2种填料的BAF去除TN效率基本相同,这与图3(b)中结果对应,即当HRT足够时,微生物量不再是限制因素,因此,2种填料特性基本不影响BAF对污染物的去除效果。按照理论,当C/N大于2.86,即可满足反硝化脱氮需求,但在实际污水处理脱氮过程中,受进水DO等各种因素的影响,此值要高于理论值。试验结果显示:当C/N低于4.5时,2种填料的BAF对TN去除率随C/N的增加而增加;当C/N为4.5时,TN去除率为

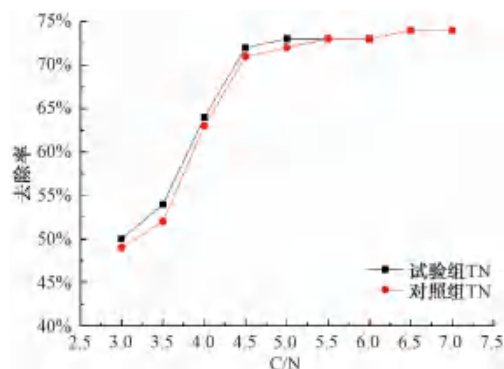


图4 C/N对2种反硝化BAF运行效果对比

Fig. 4 Comparison of C/N on Operational Effects of Two Denitrification BAFs

72%,随着 C/N 的增加,TN 去除率最高可达 74%。考虑到经济性,建议采用 MPF 的 BAF 运行时 C/N 为 4.5。

2.3 反洗周期对比试验

滤池在运行一定时间后,随着填料内微生物繁殖生长及拦截的悬浮物积累,会造成填料的堵塞,导致处理效果下降。本对比试验是以进水渠液位上涨高度为依据进行反冲洗,中试试验期间,进水渠液位上涨 10 cm 时,即对填料区进行反冲洗。

由图 5 可知,硝化反应阶段,试验组反洗周期为 6~8 d,对照组为 2~4 d;反硝化反应阶段,试验组反洗周期为 4~5 d,对照组为 1~2 d。试验组周期长于对照组的原因是试验组采用大孔径 MPF,填料内的纳污空间远大于陶粒填料,且不易堵塞;而反硝化滤池的反洗周期短于硝化滤池的原因是反硝化反应需要外加碳源,使得微生物生长速率较快。总体上,2 种运行情况下,试验组的反洗周期都为对照组的 2 倍以上,即采用 MPF 的 BAF 比陶粒的 BAF 节约了反洗水量和能耗,并提高了污水厂的净产水量。参照试验反洗情况,以反洗频次为计算依据,当 MPF 曝气生物滤池作为硝化池时,反洗能耗仅为陶粒曝气生物滤池的 51.7%;当作为反硝化池使用时,MPF 曝气生物滤池的反洗能耗为陶粒曝气生物滤池的 43.8%。

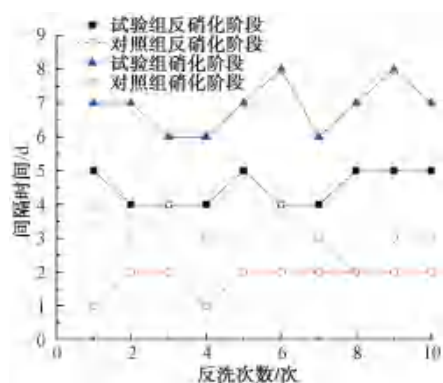


图 5 2 种填料 BAF 反冲洗周期对比

Fig. 5 Comparison of Two Kinds of Filler on BAF Backwash Cycles

3 结论

(1)当 HRT 为 30 min 时,MPF 的氨氮容积负荷为 0.256 kg 氨氮/(m³·d),而陶粒填料容积负荷为 0.228 kg 氨氮/(m³·d);当 HRT 为 25 min 时,MPF

的 TN 容积负荷为 0.408 kg TN/(m³·d),而陶粒填料的 TN 容积负荷为 0.297 kg TN/(m³·d)。这表明以 MPF 为载体的 BAF 的硝化与反硝化速率高于以陶粒为载体。

(2)以 MPF 为载体的 BAF 发生硝化、反硝化作用的最佳 HRT 为 30 min。

(3)硝化阶段采用 MPF 的 BAF 的反洗周期为 6~8 d,反硝化阶段 MPF 的 BAF 的最佳 C/N 为 4.5,反洗周期为 4~5 d,MPF 的 BAF 的反洗周期为陶粒 BAF 的 2 倍。

(4)同样处理量条件下,以反洗频次为计算依据,采用 MPF 的 BAF 作为硝化池时,反洗能耗仅为陶粒的 51.7%;作为反硝化池使用时,采用 MPF 的反洗能耗为陶粒的 43.8%,节能效果明显。

(5)本次试验对于采用 MPF 的 BAF 的抗冲击能力与高浓度水质未进行研究,故后续需对其进行补充试验。

参考文献

- [1] 曹文平,张永明,钱鲁泓.两段曝气生物滤池废水处理的研究[J].水处理技术,2006(3):62-65.
- [2] 李海鑫,刘秀红,杨忠启,等.调整气水比优化高氨氮废水 BAF 一体化脱氮[J].中国环境科学,2019,39(9):3807-3813.
- [3] YANG Q, ZHOU T, LIU X H, et al. Implementation of integrated autotrophic nitrogen removal system at normal temperature by returned sludge[J]. CIESC Journal, 2017, 68(5): 2081-2088.
- [4] 张薇,史开武,孔惠.曝气生物滤池(BAF)的发展与现状[J].北京石油化工学院学报,2005(3):24-30.
- [5] 古腾,吴勇,王楠楠.曝气生物滤池-模块化人工湿地组合工艺处理农村生活污水[J].环境工程,2018,36(1):20-24.
- [6] 崔福义,张兵,唐利.曝气生物滤池技术研究与应用进展[J].环境污染治理技术与设备,2005(10):4-10.
- [7] 张小玲,李强,王靖楠,等.曝气生物滤池技术研究进展及其工艺改良[J].化工进展,2015,34(7):2023-2030.
- [8] MOORE R, QUARMBY J, STEPHENSOM T. The effects of media size on the performance pf biological aerated filters[J]. Water Research, 2001, 35(10): 2514-2522.
- [9] 李志豪,朱远墨,丰传雯,等.磁场强化曝气生物滤池处理高浓度氨氮废水的研究[J].环境科学学报,2021,41(2):440-450.
- [10] 靖青秀,游威,黄晓东,等.钴渣基陶粒脱除曝气生物滤池废水中氮磷研究[J].水处理技术,2020,46(10):28-32.

(下转第 78 页)

表 4 不同工艺运行参数、成本及处理效果对比
Tab. 4 Comparison of Operating Parameters, Costs and Treatment Effect of Different Processes

项目	MLSS/(mg·L ⁻¹)	<i>r</i>	<i>R</i>	SV ₃₀	运行成本	对 TN 去除效果
分点进水正置 AAO	2 500~3 500	220%	50%~70%	25%~40%	低	有效
倒置内回流 AAO	2 500~3 500	220%	50%~70%	25%~40%	较高	不明显
倒置 AAO 分点进水	2 500~3 500	220%	50%~70%	25%~35%	高	不明显
延长缺氧区 AAO 工艺	2 500~3 500	220%	50%~70%	25%~40%	低	不明显
进水超越初沉池+延长缺氧区	2 500~3 500	220%	50%~70%	25%~40%	较低	有效

效率无明显提升;采用“进水超越初沉池+分点进水+延长缺氧区”运行模式,即使在冬季也可以明显提高污水处理厂对氮的去除效果。通过挖掘污水处理厂潜在碳源,优化运行方式,在不进行设备实施改造的基础上,可实现污水处理厂 TN 含量稳定小于 10 mg/L 的要求。该工艺运行模式也为污水处理厂提标改造后工艺运行优化提供依据,实现节能降耗;同时,外加碳源可以作为常备药剂,用于 TN 异常时的应急投加。

参考文献

- [1] 江苏省环境保护厅,江苏省质量技术监督局.太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值:DB 32/1072—2018[S]. 2018.
- [2] 国家质检总局.城镇污水处理厂污染物排放标准:GB 18918—2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [3] 杨晨宵,盛铭军,黄继会,等.“准Ⅳ类”标准下城镇污水厂提标改造的难点与举措[J].工业水处理,2020,40(11):15-21.
- [4] HUANG W, GONG B Z, WANG Y M, et al. Metagenomic analysis reveals enhanced nutrients removal from low C/N municipal wastewater in a pilot-scale modified AAO system coupling electrolysis[J]. Water Research, 2020, 173: 115530-115530. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115530.
- [5] TORNO J, NAAS C, SCHROEDER J P, et al. Impact of hydraulic retention time, backflushing intervals, and C/N ratio on the SID-reactor denitrification performance in marine RAS [J]. Aquaculture, 2018, 496: 112-122. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2018.07.004.
- [6] 张硕,邹伟国.多点进水的倒置 AAO 工艺处理低碳源城市合流污水[J].环境科技,2014,27(1):11-14.
- [7] WILÉN B M, LUMLEY D, MATTSSON A, et al. Relationship between floc composition and flocculation and settling properties studied at a full scale activated sludge plant [J]. Water Research, 2008, 42(16): 4404-4418.
- [8] GAO C D, WANG W X, FAN S X, et al. Effect on denitrification efficiency in alternating process at different C/N ratio [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1030-1032: 442-445. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1030-1032.442.
- [9] YIN Y, HUI Y Q, XU G Y, et al. Enhanced nutrients removal resulting from energy metabolism improvement in the anoxic-anaerobic-oxic process (reversed AAO) [J]. Desalination and Water Treatment, 2021, 217: 286-293. DOI: 10.5004/dwt.2021.26887.
- [10] 袁砚,朱亮.中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响[J].环境科学,2016,37(11):4289-4295.
- [11] 王骞,袁林江,陈希,等.不同碳源下缺氧/好氧连续流系统生物除磷效果及其机理[J].环境工程学报,2021,15(3):954-961.
- [12] LIU J Y, HUANG J G, SHI B F, et al. Riboflavin enhanced denitrification of artificial wastewater under low C/N condition in cold season [J]. Bioresources, 2021, 16(1): 1949-1957.
- [11] 聂中林,马赫,梁鹏,等.不同填料曝气生物滤池处理微污染河水的效果[J].中国给水排水,2020,36(17):41-48.
- [12] 贺君,张腾达,裴宪,等.一种新型曝气生物滤池填料的研究[J].非金属矿,2020,43(3):14-16.
- [13] 李新凯,郑春华.双层填料反硝化深床滤池脱氮的研究[J].中国给水排水,2017,33(7):94-96.
- [14] 陈昱璇,赵光,邓建民,等.生态因子对改性聚氨酯生物膜系统运行效能的影响[J].黑龙江农业科学,2015(1):44-48.
- [15] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [16] 李露,张怀宇,镇祥华,等.陶粒 BAF 在某小城镇污水处理中抗冲击负荷研究[J].中国给水排水,2017,33(17):93-97.

(上接第 67 页)