

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.20.002

上向流反硝化滤池在高排放标准污水厂的应用研究

叶昌明, 伍波

(深圳市清水水业股份有限公司, 广东 深圳 518172)

摘要: 在地表水准Ⅳ类及以上的高排放标准背景下,大多数污水处理厂采用强化二级生化处理后仍难以达标,需增加深度处理工艺。近年来,上向流反硝化滤池(UFDN)作为一种高效的深度处理工艺,应用逐渐增多。综述了UFDN工艺优势、基本原理、设计参数、工程应用情况以及在高排放标准下取得的研究成果,结合行业发展趋势,指出了该工艺存在的问题,并展望了UFDN未来发展的方向,以期对相关研究及工程应用提供参考。

关键词: 污水处理厂; 上向流反硝化滤池; 高排放标准; 深度处理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)20-0007-09

Applied Research of Upflow Denitrification Filter in WWTPs with High Discharge Standards

YE Chang-ming, WU Bo

(Shenzhen Qingquan Water Industry Co. Ltd., Shenzhen 518172, China)

Abstract: Under the background of high discharge standards of surface quasi-Ⅳ and above, most wastewater treatment plants (WWTPs) still struggle to meet the standards after strengthening their secondary biochemical treatment capacity, and need to increase the advanced treatment process. In recent years, the upflow denitrification filter (UFDN) application as a highly efficient advanced treatment process has gradually increased. This paper summarizes the advantages, basic principles, design parameters, engineering applications, and research results achieved in the high discharge standards of the UFDN process. Combining with the industry development trend, the problems of the process were pointed out, and the direction of the future development of UFDN was prospected, so as to provide a reference for the relevant research and engineering applications.

Key words: wastewater treatment plant; upflow denitrification filter; high discharge standard; advanced treatment

1 我国污水厂高排放标准需求及意义

2015年4月国务院印发《水污染防治行动计划》,提出加快城镇污水处理设施建设与改造。于是各地纷纷进行污水处理厂的提标改造,主要进行总氮、总磷和SS等污染物的强化去除。大部分污水处理厂通过优化前端生化池性能,采取新增深度处

理工艺进行提标改造,使出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。但是重要河流、湖泊富营养化及蓝藻问题依然严重,现有GB 18918—2002的一级A排放标准已不能满足要求。

因此,各地政府针对重点流域及敏感区域颁布

基金项目: 深圳市可持续发展专项(KCXFZ202002011006555)

了地表水准Ⅳ类甚至是地表水准Ⅲ类的高排放标准^[1-2]。例如,四川省地标《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016)中的城镇污水处理厂水污染物排放限值、河北省地标《大清河流域水污染物排放标准》(DB 13/2795—2018)中的重点控制区水污染物排放限值、天津地标《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 12/599—2015)中的A标准等,均要求出水 $\text{COD} \leq 30 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N} \leq 1.5 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TP} \leq 0.3 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$ 。北京地标《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012)中的A标准则要求城镇污水处理厂出水水质应达到地表水准Ⅲ类标准,出水 $\text{COD} \leq 20 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N} \leq 1 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TP} \leq 0.2 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$ 。昆明市颁布了全国最严的城镇污水处理厂排放标准《城镇污水处理厂主要水污染物排放限值》(DB 5301/T 43—2020),其A级标准要求出水 $\text{COD} \leq 20 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N} \leq 1 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TP} \leq 0.05 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TN} \leq 5 \text{ mg/L}$ 。

面对各地提出的污水处理高排放标准,现有污水处理厂常规“预处理+生物处理”工艺难以达到相应标准要求。因此,提标改造项目需要根据出水排放标准选择合适的提标改造方式及深度处理工艺,新建污水处理厂项目则需根据进水水质及出水排放标准选择合理的技术路线,确保出水稳定达标。

2 高排放标准下污水处理技术路线分析

将高排放标准与一级A标准进行比较,发现两

者的差异主要体现在 COD 、 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 和 TP 指标上。针对上述指标,需选择相应的污水处理技术或强化手段进行处理,通常采用的手段有优化工艺运行条件、提高系统活性污泥浓度、增加深度处理工艺等。

2.1 优化运行条件

优化运行条件主要包括改变进水方式和优化运行控制方式。其中,改变进水方式常采取多点进水改造。例如,苏北某高新开发区污水处理厂一期工程^[3]将原 A^2/O 工艺升级为改良 A^2/O 工艺,按比例分配进水至厌氧池和缺氧池,充分利用原水中的碳源,实际出水水质由《连云港市水污染物排放标准》(DB 32/180—1998)的二级标准提高至GB 18918—2002的一级A标准。实践表明,充分挖掘生化工艺的潜能,通过实施优化曝气系统精确控制、内回流及强化除磷等措施,能够保证出水稳定达到升级后的标准要求^[4]。

2.2 提高活性污泥浓度

提高活性污泥浓度是增强生化处理能力较为直接的方法,通常选用膜生物反应器(MBR)^[5]、移动床生物膜反应器(MBBR)^[6]、复合粉末载体生物流化床(HPB)^[7],其核心技术分别为膜组件、悬浮填料流化、复合粉末载体及载体回收系统。

上述三种提标改造工艺在污水处理厂应用的优缺点如表1所示。

表1 污水处理厂不同提标改造工艺的优缺点

Tab.1 Advantages and disadvantages of different processes for wastewater treatment plant upgrading and reconstruction

| 工艺类型 | 核心技术 | 优点 | 缺点 |
|------|---------------|---------------------------------|---------------------------|
| MBR | 膜组件 | 工艺占地面积小、出水水质好、剩余污泥量少、无需二沉池 | 建设成本及后期运维费用高、膜易污染、运营管理要求高 |
| MBBR | 悬浮填料流化 | 传质效率高、抗冲击负荷能力强、无污泥回流 | 填料易出现局部堆积、运营能耗较高 |
| HPB | 复合粉末载体、载体回收系统 | 不新增池容,产量翻倍、投资成本低、建设周期短、可实现不停产改造 | 生物池及二沉池易出现浮泥、载体回收增加运维成本 |

2.3 增设深度处理工艺

大多数要求达到高排放标准的污水处理厂在强化二级生化处理后仍难达标,需增加深度处理工艺。地表水准Ⅳ类标准的项目常用反硝化深床滤池去除 TN ,若还需处理 TP 、 $\text{NH}_3\text{-N}$,常与高效沉淀池、曝气生物滤池组合使用。地表水准Ⅲ类标准的项目重点关注 COD 和 BOD_5 ,常采用臭氧-活性炭滤池或活性焦滤池与反硝化深床滤池、高效沉淀池组

合工艺。

表2列举了不同排放标准下的污水处理厂深度处理组合工艺^[8-12]。

上向流反硝化滤池(UFDN)作为一种高效的深度处理工艺,近些年应用逐步增多。相比传统下向流反硝化深床滤池,该工艺具有脱氮效率高、占地面积小、运行成本低、处理效果稳定等优势。基于此,UFDN在污水处理厂高排放标准应用及研究方

面取得了一定进展。

表2 典型深度处理组合工艺
Tab.2 Typical combined advanced treatment processes

| 深度处理组合工艺 | 强化去除指标 | 排放标准 |
|---------------------|-----------------------------|--------|
| 反硝化深床滤池 | TN | 地表水准Ⅳ类 |
| 高效沉淀池+反硝化深床滤池 | TN、TP | 地表水准Ⅳ类 |
| 曝气生物滤池+反硝化深床滤池 | NH ₃ -N、TN | 地表水准Ⅳ类 |
| 臭氧-活性炭吸附 | COD、BOD ₅ | 地表水准Ⅲ类 |
| 反硝化深床滤池+臭氧-活性炭吸附 | TN、COD、BOD ₅ | 地表水准Ⅲ类 |
| 高效沉淀池+反硝化深床滤池+活性炭吸附 | COD、BOD ₅ 、TN、TP | 地表水准Ⅲ类 |

3 UFDN在高排放标准污水厂的应用

3.1 UFDN工艺

图1为UFDN比较典型的结构形式,UFDN过滤方式^[13]为待滤水从滤池底部进入、上部流出,集生物脱氮及过滤于一体。其基本原理是利用滤料表面生长的生物膜(反硝化细菌),以有机碳源作为电子供体,以硝酸盐或亚硝酸盐作为电子受体将其还原成氮气,从而去除污水中的TN;由于UFDN纳污量大,可通过投加除磷剂进行微絮凝接触过滤,同步去除TP及SS。

UFDN技术主要特点:具有同步脱氮除磷功能,脱氮效率高,出水TN能稳定低于5 mg/L;进水不复氧,采用碳源投加精准控制,药剂投加量可节省30%以上;纳污能力强,反洗周期长,产水量高;无

需驱氮,进一步保证了微生物的生长环境,提高了反硝化系统的稳定性。

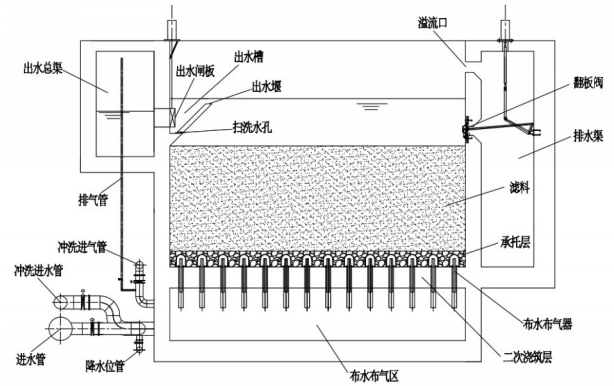


图1 典型的UFDN结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of a typical UFDN structure

根据《上向流反硝化滤池设计标准》(T/CUMA 50053—2023)^[14],UFDN用于深度处理,当进水TN≤25 mg/L、出水TN≤10 mg/L时,UFDN平均滤速宜为4~16 m/h,空床停留时间宜为15~30 min;采用石英砂滤料时,滤料厚度宜为1.5~3.0 m,滤料粒径为2~4 mm;采用火山岩或陶粒滤料时,滤料厚度宜为2.0~4.0 m,滤料粒径为3~5 mm或4~6 mm。

3.2 UFDN在高排放标准污水厂的应用

近些年,随着污水处理厂排放标准的提高,UFDN已成为污水厂提标改造中的一种投资省、见效快、TN去除率高的有效手段。近些年国内采用UFDN工艺的高排放标准污水厂案例^[15-18]如表3所示。

表3 部分UFDN高排放标准工程案例
Tab.3 Part of the UFDN high discharge standard project cases

| 污水厂名称 | 规模/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹) | 主体工艺 | UFDN运行参数 | 深度处理进水水质 | 排放标准 | 实际出水 |
|-------------|---|-------------------------------|---|--|--------------------------|---|
| 广东韶关第二污水处理厂 | 10 | 预处理+AO微曝氧化沟+曝气生物滤池+UFDN+紫外消毒池 | 滤速5.2 m/h,石英砂滤料粒径2~4 mm,滤料厚度2.0 m,空床停留时间23.1 min,未投加除磷药剂 | 曝气生物滤池进水:COD为18~52 mg/L, BOD ₅ 为5.2~10.8 mg/L, TN为11.3~15.5 mg/L, TP为0.30~0.48 mg/L, NH ₃ -N为0.86~2.8 mg/L, SS为6~15 mg/L | 一级A标准与广东省地方标准第二时段一级标准较严值 | 地表水准Ⅲ类, COD为8.2~19.5 mg/L, BOD ₅ 为3~4 mg/L, TN为5.0~9.8 mg/L, TP为0.12~0.18 mg/L, NH ₃ -N为0.1~0.4 mg/L, SS为1.1~2.5 mg/L |
| 深圳固戍水质净化厂 | 6 | 预处理+AAO+UFDN+紫外消毒池 | 滤速5.3 m/h,石英砂滤料粒径2~4 mm,滤料厚度2.4 m,空床停留时间27.0 min,乙酸钠(25%)投加量40~80 mg/L, PAFC(11%)投加量80~130 mg/L | UFDN进水:COD为18~35 mg/L; BOD ₅ 为4~8 mg/L; TN为7.6~15.3 mg/L; TP为0.71~1.32 mg/L; NH ₃ -N为0.3~0.9 mg/L | 地表水准Ⅴ类, TN≤15 mg/L | 地表水准Ⅲ类, COD为9.9~18.7 mg/L, BOD ₅ 为2.4~3.8 mg/L, TN为5.6~10.0 mg/L, TP为0.16~0.18 mg/L, NH ₃ -N为0.01~0.9 mg/L |

续表3 (Continued)

| 污水厂名称 | 规模/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹) | 主体工艺 | UFDN运行参数 | 深度处理进水水质 | 排放标准 | 实际出水 |
|-----------------|---|---|---|---|------------------------|---|
| 深圳横岗污水处理厂 | 10 | 预处理+SBR+UFDN+纤维转盘滤池+接触消毒池 | 滤速 7.2 m/h, 石英砂滤料粒径 2~4 mm, 滤料厚度 2.5 m, 空床停留时间 21.0 min, 乙酸钠(25%)投加量 72.7~178.3 mg/L, 未投加除磷药剂 | UFDN进水: COD为 22~36 mg/L, BOD ₅ 为 5~8 mg/L, TN 为 22.7~38.2 mg/L, TP 为 0.24~0.38 mg/L | 地表水准 V类, TN≤15 mg/L | 地表水准 IV类, COD 为 11~21 mg/L, BOD ₅ 为 2.1~4.9 mg/L, TN 为 5.1~11.6 mg/L, TP 为 0.15~0.24 mg/L |
| 山西平定污水处理厂 | 3 | 预处理+AAO+曝气生物滤池+UFDN+高效沉淀池+消毒池 | 滤速 6.6 m/h, 火山岩滤料粒径 4~6 mm, 滤料厚度 2.8 m, 空床停留时间 25 min, 乙酸钠(25%)投加量 60~160 mg/L, 高效沉淀池投加除磷药剂 | 曝气生物滤池进水: COD、BOD ₅ 均已达标, TN 为 12~18 mg/L, TP 为 0.45~0.74 mg/L, NH ₃ -N 为 7~10 mg/L | 地表水准 V类, TN≤10 mg/L | 地表水准 IV类, TN≤8 mg/L |
| 安徽界首田营科技园污水处理厂 | 1.5 | 预处理+沉淀池+曝气生物滤池+UFDN+磁混凝沉淀池+接触消毒池 | 滤速 6.4 m/h, 火山岩滤料粒径 3~5 mm, 滤料厚度 2.8 m, 空床停留时间 26 min, 乙酸钠(20%)投加量 70~120 mg/L | UFDN 进 水 : COD、BOD ₅ 、NH ₃ -N 和 TP 均已达标, TN 为 12.5~22.5 mg/L | 地表水准 IV类, TN<15 mg/L | 地表水准 IV类, TN<10 mg/L |
| 河南省三门峡市某县城污水处理厂 | 3 | Bardenpho+絮凝沉淀+UFDN+曝气生物滤池+纤维转盘滤池+接触消毒池 | 滤速 6.4 m/h, 陶粒滤料粒径 4~6 mm, 滤料厚度 3.0 m, 空床停留时间 28.1 min, 30% 乙酸钠(具体量未知), 沉淀池投加除磷药剂 | DN 进 水 95% 概 率 : COD≤40.18 mg/L, BOD ₅ ≤7.32 mg/L, TN≤14.85 mg/L, TP≤0.37 mg/L, NH ₃ -N≤6.15 mg/L, SS≤6.82 mg/L | 地表水准 IV类 | 地表水准 IV类, COD≤22.75 mg/L, BOD ₅ ≤3.91 mg/L, TN≤10.53 mg/L, TP≤0.20 mg/L, NH ₃ -N≤4.6 mg/L, SS≤5.63 mg/L |
| 江苏某市污水处理厂 | 17 | 改良式MSBR/MBR工艺+硝化+UFDN+臭氧-生物活性炭+超滤 | 滤速 10 m/h, 陶粒滤料粒径 4~6 mm, 滤料厚度 3.0 m, 空床停留时间 18 min, 乙酸(90%)投加量 20~30 mg/L, 未投加除磷药剂 | CN 进 水 : COD 为 12~26 mg/L, BOD ₅ 为 3.8~7.1 mg/L, TN 为 5.3~11.6 mg/L, TP 为 0.15~0.40 mg/L, NH ₃ -N 为 0.22~2.22 mg/L, SS 为 1~6 mg/L | 地表水准 III类, TN≤7.5 mg/L | 地表水准 III类, COD 为 8~12 mg/L, BOD ₅ 为 2.2~3.8 mg/L, TN 为 3.4~4.9 mg/L, TP 为 0.03~0.14 mg/L, NH ₃ -N 为 0.02~0.85 mg/L, SS 为 1~3 mg/L |

通过对上述项目的调研可知, UFDN 滤速基本在 5.2~10 m/h 之间, 空床停留时间为 18~28 min, 大多采用储存运输安全的乙酸钠为碳源, C/N 比为 3~5, 出水水质稳定达到高排放标准。值得注意的是, 当进水 TP<0.5 mg/L 时, 无需外加除磷药剂, 仅通过滤池生物代谢、吸附拦截等作用, 就可使 TP 去除率达到 30%~50%; 当进水 TP>0.7 mg/L 甚至更高时, 需要外加除磷药剂, 在进水端设管道混合器或混合池投加除磷药剂, 在滤池内实现除磷, TP 去除率达到 70%~85%, 不需要高效沉淀池, 但会增加滤池反冲洗频次。例如, 深圳市固戍污水处理厂在 PAFC (有效浓度 11%) 投加量为 80~130 mg/L 时, 过滤周期从 48 h 降至 16 h。

3.3 UFDN 研究进展

3.3.1 提升脱氮能力

UFDN 的总氮去除能力主要取决于系统内反硝

化菌的数量, 因此优化微生物的生长环境至关重要。调节进水 pH 保持在 6.5~7.8, 采用恒液位进水方式或者阀门配水控制进水溶解氧, 以提供适宜的生长条件。在生长环境一定的情况下, 可从优化生物膜量、碳源的选择、调节水力停留时间等方面提升脱氮能力。

UFDN 应选用高比表面积、良好通透性和吸附性能的滤料, 以提供足够的附着面积供反硝化菌生长。研究表明, 与石英砂滤料相比, 陶粒比表面积大, 生物膜量更多, 因此其脱氮效果更优^[19]。Moll 等^[20]认为生物膜量多并不代表生物活性较高, 其生物脱氮效果与脱氢酶活性有关; 叶星等^[21]研究发现, 生物膜量为 1 246.6~2 542.7 mg/L 时, 脱氢酶活性最大, 脱氮效果最好, 出水 TN 平均为 (0.88±0.04) mg/L, TN 去除率为 89.7%。

在碳源类型选择方面, 早期的研究多集中在乙

酸钠、乙酸、甲醇、乙醇、葡萄糖等单一有机物上^[22-23],乙酸钠最常用但成本高,甲醇成本低、脱氮速率高但易燃易爆。为了提高UFDN的脱氮效率,考虑经济性及操作安全性,余琴芳等^[24]采用UFDN处理硝化滤池出水,在水力停留时间为20 min的条件下,研究了5种碳源(乙酸钠、甲醇、复合碳源1、复合碳源2、葡萄糖)的反硝化脱氮情况,结果表明,复合碳源1的脱氮效果最好,运行费用仅次于甲醇,当进水TN为18.0~24.0 mg/L时,出水TN均值低于9.8 mg/L, TN去除率为52.0%;且进水COD为65~90 mg/L,出水COD能够稳定在30 mg/L以下,达到地表水准Ⅳ类标准。因此,综合考虑经济性与脱氮效率,可选用优质的复合碳源。

水力停留时间(HRT)也是影响UFDN脱氮效率的重要因素,HRT越长脱氮效果越好。文浩舟^[25]以UFDN、污水厂尾水为研究对象,以生物陶粒为滤料、葡萄糖为碳源,在进水TN为14~18 mg/L情况下,HRT为20 min时TN去除率较差,HRT≥60 min时脱氮效果明显提升,出水TN<10 mg/L,但HRT超过60 min后脱氮效率增加缓慢。同时研究还发现,NH₃-N、TP的去除效果与HRT关系不大,而出水COD浓度随着HRT的增加而降低,呈现负相关关系;当HRT为60 min时,进水COD为103.2~110.5 mg/L、NH₃-N为1.3~3.5 mg/L、TP为0.26~0.51 mg/L,出水COD为20.6 mg/L、NH₃-N为1.4 mg/L、TP为0.27 mg/L(无需投加除磷药剂),出水各项指标稳定达到地表水准Ⅳ类标准。

除了优化上述影响因素外,引入外源菌种也能提升反硝化滤池脱氮效率。闫沛涵等^[26]采用实验室筛选的高效反硝化菌YYD4强化反硝化生物滤池脱氮,结果表明强化反硝化生物滤池总氮去除率为(94.11±6.33)%,较未强化滤池提升了19.89%。

3.3.2 强化除磷效果

众所周知,UFDN的生物除磷效率较低,常采用外加化学药剂强化除磷效果^[27],在进水端增设混合池或者管道混合器,投加PAC或PAFC等除磷药剂,快速混合后进入滤池,污水中含磷物质经微絮凝反应形成的絮体直接过滤而实现TP去除。李宗伟^[28]以“硝化-反硝化”两级上向流生物滤池进行除磷效能的研究,结果表明,UFDN在进水TP为2.5~3.5 mg/L时,AlCl₃投加量为90 mg/L,出水TP能够稳定低于0.2 mg/L,TP去除率高达90%以上,达到地表

水准Ⅲ类标准,且证实了外加除磷药剂不会影响其对TN和COD的去除效果。李亚楠等^[29]搭建了两套UFDN(以无机-有机基质为填料)对比研究系统间除磷的效果差异,发现黄铁矿-PHBV系统的除磷效果(磷去除率为83.0%)远高于火山岩-PHBV系统(磷去除率为22.86%),主要原因是黄铁矿-PHBV系统中黄铁矿生成的铁离子与磷酸盐形成沉淀物被去除,而火山岩-PHBV系统则主要通过火山岩物理吸附作用去除TP,效率相差甚远,这也为反硝化滤池协同除磷提供了一种新的思路。

3.3.3 提高出水稳定性

UFDN作为深度脱氮工艺时,常在其进水混合池或者进水管道混合器处投加碳源,但需防止出水COD超标。郑晓英等^[30]、郑俊等^[31]以甲醇、乙酸钠为碳源,采用UFDN处理污水厂的二沉池出水,当C/N比为4~6时,出水COD稳定低于30 mg/L、TN≤10 mg/L,能够满足地表水准Ⅳ类水质标准;当C/N比>6时,出水COD易超标(COD>30 mg/L)且对TN去除贡献较小。因此,需适当控制碳源投加量。

此外,碳源投加方法尤为关键。国内污水处理厂大多采用固定和人工加药方式,智能化程度较低,常因过量投加而导致出水COD、BOD₅超标^[32-33],同时还造成碳源浪费。为此,刘圣誉等^[34]利用进水ORP、pH、DO与温度的关联性,建立了外碳源投加模型,发现预测值与实际值接近,误差低于5%。该模型能够为修正投加量的前馈控制提供参考基础,两种模式相结合可构建完善的碳源投加控制系统。因此,合理控制碳源投加比例和搭建控制模型是提升出水稳定性的关键。

3.3.4 降低堵塞风险

UFDN实践中常遇滤头堵塞与滤料板结问题,近年已总结出一些减轻滤池堵塞的措施。为了防止滤池底部滤头堵塞,进水宜设置精密格栅,采用防堵塞大缝隙专用滤头^[35]或者中阻力布水、大阻力布气的多功能滤管^[36]。解决滤料板结问题需要以预防为主,防治结合。Liu等^[37]、金秋等^[38]研究了反硝化滤池生物膜厚度与反冲洗的关系,通过优化反冲洗强度和周期控制好生物膜量,当C/N为4时,出水COD为(28.0±1.2) mg/L;进一步优化运行条件,将UFDN反冲洗周期控制为1 d,出水水质更佳,出水COD为(17.9±1.4) mg/L,达到地表水准Ⅲ类标准。UFDN反冲洗时应先降水位,目的是利用滤料

以上的清水快速冲洗滤床,将滤池底部拦截的杂质冲洗干净,然后进行单气洗,充分起到滤料松动摩擦的作用,以利于后续滤料清洗。除此之外,还可以优化反冲洗步骤,增加气水联洗次数与延长单水洗时间,提高滤料清洗力度。

4 面向高排放标准的UFDN技术发展思考

在高排放标准的背景下,UFDN研究主要集中在碳源类型与投加量、停留时间、滤料选择、协同除磷等方面的优化,对生物滤池滤料防堵塞的研究较少,特别是对反冲洗解决滤料板结问题的研究还需进一步探索。目前,UFDN在出水TN达到地表水Ⅳ类及以上标准方面已取得一定进展,主要研究了单独硫自养反硝化效果,但未与常规异养反硝化滤池进行对比。在“双碳”目标下,UFDN因其节能减排优势受到关注,但其在温室气体排放及节能方面的量化研究较少。

综上,UFDN技术在高排放标准污水处理厂的的应用研究可集中在以下几方面:

① 突破UFDN反冲洗技术瓶颈。由于UFDN底部进水、上部出水,滤池杂质及生物膜主要在中下部,现有反冲洗方法效果有限且费水耗时。气水联合冲洗方向不合理,与过滤方向一致,导致强度大。相比之下,下向流滤池反冲洗方向与过滤相反更合理。未来需研究效果更佳的反冲洗技术,以减少水耗和清洗时间。

② 探究上向流自养反硝化与异养反硝化灵活组合方式。硫自养反硝化滤池因总氮去除率高、产泥量少、无外加碳源、反洗频率低、操作简单、价格低廉等特点而成为研究热点,但市政污水应用案例非常少,可能的原因是技术不够成熟,以及进水水质已经达到出水要求但因无法停止脱氮而出现浪费滤料硫源等现象。实质上针对高排放标准的污水处理厂,采用异养反硝化与硫自养反硝化耦合,探索组合方式、调控进水溶解氧浓度等方法,在确保出水稳定性的情况下进一步降低运行成本,可为今后出水TN达到地表水Ⅳ类及以上标准提供新的思路。

③ 探索UFDN温室气体产生的效果。明晰反硝化过程中温室气体产生的途径,探究通过优化碳源种类、反冲洗方法、与硫自养反硝化组合方式等降低温室气体的产生量,实现碳减排目的。

5 结语

UFDN工艺具有脱氮效率高、同步除磷效果好、运行成本低、滤速大等优点,综合考虑进出水水质、设计参数、运行管理及工程经验等方面合理选择工艺流程,使其能够出色地发挥污水处理效能,满足污水处理厂的高排放标准需要。未来应重点探索UFDN反冲洗技术、与自养反硝化耦合技术,进一步挖掘该工艺的潜力,不断推动UFDN工艺的发展及其工程应用。

参考文献:

- [1] 张鹤清,朱帅,吴振军,等.城镇污水处理厂“准Ⅳ类”标准提标改造技术简析[J].环境工程,2019,37(6):26-30,36.
ZHANG Heqing, ZHU Shuai, WU Zhenjun, *et al.* Analysis of “quasi-category IV” standard upgrading and reconstruction technology for municipal wastewater treatment plants[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(6): 26-30, 36(in Chinese).
- [2] 李伟,卢东昱,陈永玲,等.北京市某污水厂基于准地表Ⅲ类水体出水标准的工程实践[J].中国给水排水,2017,33(2):56-60.
LI Wei, LU Dongyu, CHEN Yongling, *et al.* Engineering practice of a WWTP in Beijing City based on quasi-class III criteria of surface water [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(2): 56-60(in Chinese).
- [3] 刘加强,李昂,李莹,等.改良A²O在城市污水处理厂提标改造中的应用[J].水处理技术,2018,44(12):137-140.
LIU Jiaqiang, LI Ang, LI Ying, *et al.* Application of improved A²O process for upgrading and reconstruction of urban wastewater treatment plant [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(12): 137-140(in Chinese).
- [4] 周合喜,张金松,张庆珮.多级AO工艺在某高排放标准污水厂的优化探讨[J].中国给水排水,2022,38(20):8-13.
ZHOU Hexi, ZHANG Jinsong, ZHANG Qingpei. Discussion on optimization of multi-stage AO process in a wastewater treatment plant under high discharge standards[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(20): 8-13(in Chinese).
- [5] 鲍任兵,马民,徐健,等. AAO及改良型工艺耦合MBR工艺应用研究综述[J].净水技术,2022,41(3):26-31,62.
BAO Renbing, MA Min, XU Jian, *et al.* Technological

- research overview on AAO and modified process coupled with MBR[J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41 (3): 26-31,62(in Chinese).
- [6] 钱亮,贺北平,刘瑞东,等. 西安市第四污水处理厂一期工程升级改造经验总结[J]. *中国给水排水*, 2016, 32 (2): 74-78.
- QIAN Liang, HE Beiping, LIU Ruidong, *et al.* Summary of experience in upgrading and reconstruction of first stage project of Xi'an fourth WWTP[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(2): 74-78(in Chinese).
- [7] 朱灿耀,宾伟,刘薇薇,等. HPB技术在污水处理厂改造中的应用及运行效果[J]. *广东化工*, 2022, 49 (20): 153-156,144.
- ZHU Canyao, BIN Wei, LIU Weiwei, *et al.* Application and operation effect of HPB technology in renovation of sewage treatment plant [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2022, 49 (20): 153-156, 144 (in Chinese).
- [8] 李采芳,杨丹,王志刚. A/O+高效沉淀+深床滤池用于污水厂提标扩建[J]. *中国给水排水*, 2018, 34 (16): 86-92.
- LI Caifang, YANG Dan, WANG Zhigang. Application of A/O, high efficiency sedimentation tank, denitrification deep-bed filter process in upgrading and expansion of WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(16): 86-92(in Chinese).
- [9] 刘议安,冯凌溪,王平,等. 高出水标准下北京门头沟地下式再生水厂的设计[J]. *中国给水排水*, 2018, 34 (2): 73-75,90.
- LIU Yi'an, FENG Lingxi, WANG Ping, *et al.* Design of Beijing Mentougou underground reclaimed water plant with high effluent quality requirement [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34 (2): 73-75,90(in Chinese).
- [10] 邱明海. 昆明市第十四污水处理厂工程设计技术方案[J]. *给水排水*, 2019, 45 (1): 31-34.
- QIU Minghai. Technical design scheme of the fourteenth wastewater treatment plant project in Kunming City [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 45 (1): 31-34 (in Chinese).
- [11] 傅信党,龚向红. 污水处理厂排放标准执行地表水Ⅲ类标准的探索[J]. *净水技术*, 2018, 37 (5): 67-74.
- FU Xindang, GONG Xianghong. Exploration of implementation of surface water quality standard at quasi-class Ⅲ for discharge standard of wastewater treatment plant [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(5): 67-74(in Chinese).
- [12] 冯云刚,冯凯,张伟. MBR-O₃工艺用于高排放标准污水处理厂的设计案例[J]. *给水排水*, 2020, 46 (3): 79-81.
- FENG Yungang, FENG Kai, ZHANG Wei. MBR-O₃ process for the design of high discharge standards wastewater treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46 (3): 79-81(in Chinese).
- [13] 伍波,叶昌明. 江西某工业园区废水的深度处理[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(2): 97-99.
- WU Bo, YE Changming. Advanced treatment of wastewater from an industrial park in Jiangxi Province [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(2): 97-99 (in Chinese).
- [14] 中国城镇供水排水协会. 上向流反硝化滤池设计标准: T/CUWA 50053—2023 [S]. 北京:中国计划出版社, 2023.
- China Urban Water Association. Standard for Design of Upflow Denitrification Filter: T/CUWA 50053-2023 [S]. Beijing: China Planning Press, 2023(in Chinese).
- [15] 朱红青,伍波,叶昌明,等. 韶关市某污水处理厂氧化沟工艺高出水标准提标改造[J]. *中国给水排水*, 2023, 39 (10): 75-79.
- ZHU Hongqing, WU Bo, YE Changming, *et al.* Upgrading and reconstruction of oxidation ditch process with high effluent standard in a wastewater treatment plant in Shaoguan City [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(10): 75-79(in Chinese).
- [16] 谢益佳,戴仲怡,杨墨,等. 上向流石英砂深床滤池在污水处理厂提标中的应用[J]. *净水技术*, 2022, 41(5): 139-143,164.
- XIE Yijia, DAI Zhongyi, YANG Mo, *et al.* Application of upflow quartz sand deep bed filter in upgrading of WWTP [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41 (5): 139-143,164(in Chinese).
- [17] 宋田翼. Bardenpho+生物滤池(DN+CN)用于污水厂准Ⅳ类出水提标[J]. *中国给水排水*, 2020, 36 (22): 106-109.
- SONG Tianyi. Bardenpho + biofiltration (DN + CN) process used in wastewater treatment plant with effluent of quasi-Ⅳ water standard [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36 (22): 106-109(in Chinese).
- [18] 林胜. 曝气生物滤池在高标准污水处理厂提标改造中的应用[J]. *净水技术*, 2023, 42(7): 153-159.
- LIN Sheng. Application of biological aeration filter in high standard WWTP upgrading and reconstruction [J].

- Water Purification Technology, 2023, 42(7): 153-159 (in Chinese).
- [19] 吴兴海, 李咏梅. 碳氮比对不同滤料反硝化滤池脱氮效果的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 55-62.
- WU Xinghai, LI Yongmei. Effect of C/N ratio on denitrification of denitrification filters with different filter materials [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(1): 55-62(in Chinese).
- [20] MOLL D M, SUMMERS R S, FONSECA A C, *et al.* Impact of temperature on drinking water biofilter performance and microbial community structure [J]. Environmental Science & Technology, 1999, 33(14): 2377-2382.
- [21] 叶星, 马凯迪, 黄俊生, 等. 反硝化生物滤池中生物膜量与脱氮效果和脱氢酶活性的关系[J]. 环境工程学报, 2020, 14(5): 1210-1215.
- YE Xing, MA Kaidi, HUANG Junsheng, *et al.* Relationship between biofilm mass and nitrogen removal efficiency, dehydrogenase activity in the denitrification biological filter [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(5): 1210-1215(in Chinese).
- [22] 刘秀红, 甘一萍, 杨庆, 等. 碳源对反硝化生物滤池系统运行及微生物种群影响 [J]. 水处理技术, 2013, 39(11): 36-40, 44.
- LIU Xiuhong, GAN Yiping, YANG Qing, *et al.* Effects of carbon source types on the operation and nitrifying microbial community of denitrifying biofilter for advanced nitrogen removal [J]. Technology of Water Treatment, 2013, 39(11): 36-40, 44(in Chinese).
- [23] 李文龙, 杨碧印, 陈益清, 等. 不同外加碳源反硝化滤池的深度脱氮特性研究 [J]. 水处理技术, 2015, 41(11): 82-85.
- LI Wenlong, YANG Biyin, CHEN Yiqing, *et al.* Study on denitrification biological filter depth processing characteristics with different external carbon source [J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(11): 82-85 (in Chinese).
- [24] 余琴芳, 章诗璐, 杜敬, 等. 反硝化生物滤池碳源选择与运行方式优化研究[J]. 水处理技术, 2022, 48(9): 113-117, 122.
- YU Qinfang, ZHANG Shilu, DU Jing, *et al.* Study on the carbon source selection and operation optimization of denitrification biofilter [J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(9): 113-117, 122(in Chinese).
- [25] 文浩舟. 反硝化滤池对农村生活污水的深度脱氮效能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- WEN Haozhou. Study on Depth Denitrification Efficiency of Denitrification Filter for Rural Domestic Sewage[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021(in Chinese).
- [26] 闫沛涵, 兰书焕, 涂卫国, 等. 反硝化菌YYD4强化生物滤池处理低碳氮比污水效果研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(7): 83-87.
- YAN Peihan, LAN Shuhuan, TU Weiguo, *et al.* Effect of denitrifying bacteria YYD4 enhanced biofilter on the treatment of low C/N ratio sewage [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(7): 83-87(in Chinese).
- [27] 李伟伟, 高宝玉, 许春华, 等. 化学混凝对两级曝气生物滤池出水的除磷效果研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(5): 54-61.
- LI Weiwei, GAO Baoyu, XU Chunhua, *et al.* Study on chemical coagulation process for phosphorus removal from effluent of two-stage biological aerated filter [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(5): 54-61 (in Chinese).
- [28] 李宗伟. 生物滤池除磷及微絮凝除磷的效能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- LI Zongwei. Efficacy of Phosphorus Removal by Biological Filter and the Enhancement by Micro-flocculation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010(in Chinese).
- [29] 李亚楠, 张皓, 王宇晖, 等. 无机-有机基质配置对反硝化生物滤池脱氮除磷效能的影响机制[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2023, 49(2): 150-158.
- LI Yanan, ZHANG Hao, WANG Yuhui, *et al.* The influence mechanism of nitrogen and phosphorus removal efficiency in a denitrification biofilter with inorganic and organic matter substrate [J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2023, 49(2): 150-158(in Chinese).
- [30] 郑晓英, 乔露露, 王慰, 等. 碳源对反硝化生物滤池运行及微生物种群的影响 [J]. 环境工程学报, 2018, 12(5): 1434-1442.
- ZHENG Xiaoying, QIAO Lulu, WANG Wei, *et al.* Effects of carbon sources on operation and microbial population of denitrification biological filter [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(5): 1434-1442(in Chinese).
- [31] 郑俊, 程洛闻, 张德伟, 等. 低滤层下不同C/N和碳源对反硝化生物滤池脱氮性能的中试研究 [J]. 水处理技术, 2022, 48(10): 92-97, 103.

- ZHENG Jun, CHENG Luowen, ZHANG Dewei, *et al.* Pilot study on the performance in a denitrifying biofilter with different C/N and carbon sources in a low filtration layer [J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48 (10): 92-97, 103 (in Chinese).
- [32] 吴宇行, 王晓东, 陈宁, 等. 典型城镇污水处理厂碳源智能投加控制生产性试验 [J]. *环境工程*, 2022, 40 (6): 212-218, 271.
- WU Yuxing, WANG Xiaodong, CHEN Ning, *et al.* Full-scale study of an intelligent carbon dosing control system in a typical urban wastewater treatment plant [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40 (6): 212-218, 271 (in Chinese).
- [33] 周圆, 王燕, 郑凯凯, 等. 市政污水处理厂反硝化滤池启动及深度脱氮运行效果研究 [J]. *水处理技术*, 2021, 47 (2): 126-129.
- ZHOU Yuan, WANG Yan, ZHENG Kaikai, *et al.* Study on the effect of denitrification filter startup and deep denitrification operation in municipal sewage treatment plant [J]. *Technology of Water Treatment*, 2021, 47 (2): 126-129 (in Chinese).
- [34] 刘圣誉, 李彭, 何义亮, 等. 基于人工神经网络的反硝化滤池外碳源投加控制 [J]. *中国给水排水*, 2020, 36 (7): 19-25.
- LIU Shengyu, LI Peng, HE Yiliang, *et al.* External carbon source dosage control in denitrification biofilter based on artificial neural network [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36 (7): 19-25 (in Chinese).
- [35] 袁挺. 上向流式反硝化滤池在高含氮城镇污水处理厂提标改造工程中的设计与运行实践 [J]. *广东化工*, 2020, 47 (1): 104-105, 103.
- YUAN Ting. Design and operation practice of upflow-denitrification-filter in reconstruction project of wastewater treatment plant with high nitrogen content [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2020, 47 (1): 104-105, 103 (in Chinese).
- [36] 伍波, 叶昌明, 王小林, 等. 上向流反硝化深床滤池用于污水厂提标改造 [J]. *中国给水排水*, 2022, 38 (4): 103-108.
- WU Bo, YE Changming, WANG Xiaolin, *et al.* Application of upflow DDBF in upgrading and reconstruction of a WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38 (4): 103-108 (in Chinese).
- [37] LIU X H, WANG H C, YANG Q, *et al.* Online control of biofilm and reducing carbon dosage in denitrifying biofilter: pilot and full scale application [J]. *Frontiers Environmental Science & Engineering*, 2017, 11 (1): 1-8.
- [38] 金秋, 陈昊, 崔敏华, 等. 反硝化生物滤池反冲洗周期优化及水力特性 [J]. *环境工程学报*, 2019, 13 (6): 1425-1434.
- JIN Qiu, CHEN Hao, CUI Minhua, *et al.* Optimization of backwashing cycle and hydraulic characteristics of denitrifying biofilter [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13 (6): 1425-1434 (in Chinese).

作者简介: 叶昌明 (1964-), 男, 浙江温岭人, 硕士, 高级工程师, 从事水处理研究与应用工作。

E-mail: 390928402@qq.com

收稿日期: 2024-04-02

修回日期: 2024-05-24

(编辑: 丁彩娟)

精打细算用好水资源,
从严从细管好水资源