

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.04.018

上向流反硝化深床滤池用于污水厂提标改造

伍波, 叶昌明, 王小林, 陈红继, 彭金城
(深圳市清水业股份有限公司, 广东 深圳 518116)

摘要: 广东省某水质净化厂一期工程原采用SBR+纤维转盘滤池为主体的工艺,提标改造后要求主要出水指标达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的V类标准($TN \leq 15 \text{ mg/L}$),实际出水TP偶尔超标,TN严重超标。提标改造工程在现有SBR工艺后端新增上向流反硝化深床滤池模块化水处理装备,出水 $COD \leq 30 \text{ mg/L}$ 、 $BOD_5 \leq 6 \text{ mg/L}$ 、 $TN \leq 12 \text{ mg/L}$ 、 $TP \leq 0.3 \text{ mg/L}$ 、 $SS \leq 5 \text{ mg/L}$,达到了地表水准IV类标准,表明上向流反硝化深床滤池脱氮除磷效果好,尤其是脱氮效率较高,最大TN去除量高达 29.4 mg/L ,相应的反硝化负荷达到 $2.08 \text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

关键词: 污水处理厂; 提标改造; 模块化水处理装备; 反硝化深床滤池

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)04-0103-06

Application of Upflow DDBF in Upgrading and Reconstruction of a WWTP

WU Bo, YE Chang-ming, WANG Xiao-lin, CHEN Hong-ji, PENG Jin-cheng
(Shenzhen Qingquan Water Industry Co. Ltd., Shenzhen 518116, China)

Abstract: The first phase of a wastewater treatment plant (WWTP) originally adopted SBR and fiber rotary disc filter as the main process. The actual effluent TP occasionally exceeded the standard and TN seriously exceeded the standard. After upgrading reconstruction, it was required that the main effluent quality indexes could reach level V of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002) ($TN \leq 15 \text{ mg/L}$). In the upgrading reconstruction project, the modular water treatment equipment of upflow denitrification deep bed filter (DDBF) is added at the back end of the existing SBR process. The effluent COD, BOD_5 , TN, TP and SS are no more than 30 mg/L , 6 mg/L , 12 mg/L , 0.3 mg/L , and 5 mg/L , respectively, which reached level quasi-IV of *Environmental Quality Standards for Surface Water*. The results showed that the upflow DDBF had good nitrogen and phosphorus removal effect, especially for nitrogen that the maximum TN removal amount was as high as 29.4 mg/L , and the corresponding denitrification load reached $2.08 \text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$.

Key words: wastewater treatment plant; upgrading and reconstruction; modular water treatment equipment; denitrification deep bed filter(DDBF)

1 概述

广东省某水质净化厂设计规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,自2003年6月正式投入运行以来,污水处理设备运转良好,平均处理水量为 $9.58 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,生物处理采

用SBR工艺,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级B标准。为提高出水水质,2012年在原有基础上新增了纤维转盘滤池,出水水质执行一级A级标准(TN除外)。随

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

着“水十条”的提出,当地政府将污水厂出水要求提高至《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准V类标准($TN \leq 15 \text{ mg/L}$)。

根据该污水厂实际运行水质数据可知,出水COD、BOD₅、氨氮均能稳定达到地表水V类标准,总磷偶尔超标,但总氮严重超标。因此,需要进行深度处理,即对SBR的出水TN、TP进行处理。由于该厂可利用的占地有限,工期也比较紧张,采用传统的高效沉淀池+反硝化深床滤池不适合,因此最终选择上向流反硝化深床滤池模块化水处理装备进行提标改造。主要建设内容有:增加精细格栅、上向流反硝化深床滤池、碳源投加设施等。其中上向流反硝化深床滤池是此次提标改造工程的重点设施,需要承担大部分TN去除功能,确保出水TN稳定低于15 mg/L,同时需要进一步去除悬浮物。

2 设计进、出水水质

2018年广东省某水质净化厂(一期)提标改造前,对该污水厂提供的水质数据进行分析,确定上向流反硝化深床滤池设计进、出水水质如表1所示。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项目	COD	BOD ₅	TN	TP	SS
设计进水	≤ 50	≤ 10	≤ 25	≤ 0.5	≤ 20
设计出水	≤ 40	≤ 10	≤ 15	≤ 0.4	≤ 10

3 改造后工艺流程

根据原工艺实际运行效果,SBR工艺出水SS不稳定,容易造成纤维转盘滤池堵塞,清洗维护麻烦;同时,需要脱氮除磷。为此,在SBR池后新增精细格栅和上向流反硝化深床滤池,确保出水达标排放。改造后的工艺流程见图1。

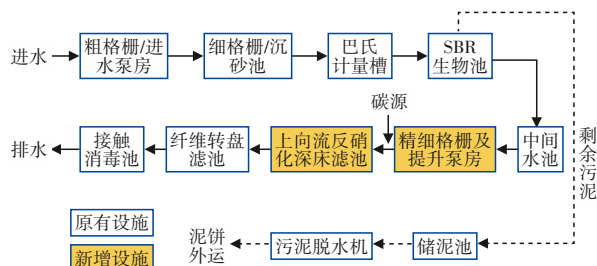


图1 改造后的污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process after upgrading and reconstruction

新建的上向流反硝化深床滤池如图2所示。



图2 改造后上向流反硝化深床滤池鸟瞰图

Fig.2 Aerial view of modified upflow denitrification deep bed filter

主要设计参数如下:上向流反硝化深床滤池装备呈两侧对称布置,每侧8格,每2格为1组,共计8组(16格),采用碳钢防腐结构;单格尺寸($L \times B \times H$)为12.0 m \times 3.0 m \times 4.5 m,单格有效过滤面积为36 m²;设计处理规模为10 \times 10⁴ m³/d,最大流量为13 \times 10⁴ m³/d($K_z=1.3$);平均滤速为7.2 m/h,强制滤速为8.3 m/h,最大滤速为9.4 m/h;滤料采用石英砂,粒径为2~4 mm,滤料层高2.5 m,空床停留时间为20.8 min。

自控系统设计参数:采用分布式系统,滤池设公共柜(主站)1台,CPU采用施耐德M340系列PLC,用于控制反洗风机、反洗水泵、中间提升泵的运行;每组滤池设就地控制柜(控制子站)1套,共计8台,采用施耐德分布式远程I/O模块,用于控制各组滤池的阀门;中控上位机2台,采用西门子WinCC组态软件,显示过程画面、管理及控制。控制子站负责完成每格滤池正常过滤、气洗、气水联洗、水洗的自动协调控制以及操作状态监视。每格滤池设置超声波液位计、水头损失报警仪以实现反洗条件判断。子站利用PID回路控制指令控制滤前水阀开度,从而实现各格滤池进水均衡控制,同时上传反洗工况信号。

采用气水冲洗方式,冲洗程序依次为:底部排污5~10 min;气冲5~6 min,冲洗强度12~25 L/(m²·s);气水联合反冲洗10~15 min,气冲强度12~25 L/(m²·s),水冲强度2~3 L/(m²·s);后水冲洗5~10 min,水冲强度5~9 L/(m²·s)。

4 运行效果分析

该提标改造项目从2018年12月底通水调试,

运行至今已有 2 年,运行期间其出水水质稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准Ⅳ类标准,并达到设计产水规模。上向流反硝化深床滤池

运行过程中采用浓度为 25% 的乙酸钠溶液(NaAc)作为外加碳源。2019 年 4 月—12 月的脱氮效果如表 2 所示。

表 2 2019 年 4 月—12 月的乙酸钠投加量及脱氮效果

Tab.2 Denitrification effect at different sodium acetate dosage from Apr. to Dec. 2019

月份	进水 TN/ (mg·L ⁻¹)	出水 TN/ (mg·L ⁻¹)	ΔTN 去除量/ (mg·L ⁻¹)	25%NaAc 用 量/t	累计水量/m ³	日平均水量/ (m ³ ·d ⁻¹)	NaAc 浓度/ (mg·L ⁻¹)
4 月	14.26	4.98	9.28	277.9	3 034 227	101 141	91.58
5 月	18.29	7.68	10.61	362.2	3 155 196	101 781	114.79
6 月	13.09	8.35	4.74	221.8	3 050 274	101 676	72.70
7 月	15.86	7.86	8.00	305.7	3 226 715	104 088	94.73
8 月	15.53	9.14	6.39	307.3	3 292 945	106 224	93.31
9 月	15.40	8.45	6.95	320.4	3 207 787	106 926	99.88
10 月	15.61	8.23	7.38	350.1	3 346 962	107 967	104.61
11 月	19.96	10.00	9.96	350.0	3 256 113	108 537	107.49
12 月	22.58	8.89	13.69	558.0	3 129 388	100 948	178.31

由表 2 可知,经过上向流反硝化深床滤池处理后,出水 TN 平均浓度低于 10 mg/L,随着总氮去除量的增加,相应的碳源投加量也会增加,其中在 12 月份碳源投加量达到最大值,为 178.31 mg/L,相应的总氮去除量为 13.69 mg/L。根据表 2 中乙酸钠投加浓度与 TN 去除量的数据,可以计算出 4 月—12 月反硝化深床滤池去除单位硝态氮消耗的乙酸钠投加量(NaAc/ΔTN,亚硝态氮经检测几乎为零)。

该提标改造工程采用的上向流反硝化深床滤池单位硝态氮消耗的乙酸钠投加量(NaAc/ΔTN)为 2.47~3.83 kgNaAc/kgNO₃⁻-N,其中最大值为 3.83 kgNaAc/kgNO₃⁻-N,其余均不超过理论投加量(3.66 kgNaAc/kgNO₃⁻-N^[1]),表明本工程的反硝化深床滤池碳源利用率较高,主要是因为上向流进水方式不存在配水跌落充氧的现象,从而有效避免进水溶解氧(DO)二次升高,可以节约这部分 DO 作为电子受体所消耗的碳源^[2]。根据已有研究报道^[3],常规的下向流反硝化深床滤池会因进水渠道配水跌落引起 DO 值平均上升 2.19 mg/L,由此消耗了大量碳源。在相同条件下,上向流反硝化深床滤池的碳源投加量与下向流反硝化深床滤池相比,可节省 30% 以上^[4]。

此外发现,上向流反硝化滤池水头损失达到 3 m 左右时,滤池需要进行反冲洗,相对应的反洗周期为 24 h。

图 3 是该污水处理厂一期提标改造后上向流反硝化深床滤池 4 月份的 TN 处理效果,结果显示进水

TN 为 10~20 mg/L,出水 TN 大部分时间在 5 mg/L 以下,TN 去除率为 50%~80%。同时,可以发现深床滤池具有良好的抗冲击负荷能力,在进水 TN 波动较大的情况下也能够保证出水 TN 在 10 mg/L 以下。

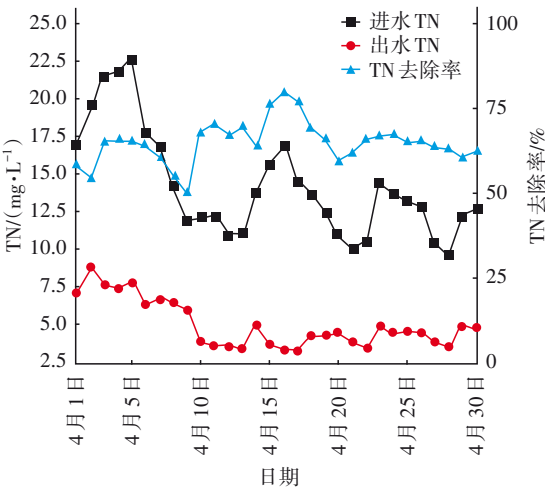


图 3 4 月份上向流反硝化深床滤池的 TN 处理效果

Fig.3 TN treatment effect of upflow denitrification deep bed filter in April

随着住建部、生态环境部、国家发改委印发《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021 年)》,2020 年该水质净化厂污水管网修复、雨污分流的逐步完善,污水厂进水水质浓度提高,提质增效后上向流反硝化滤池进水总氮较 2019 年明显升高,结果见图 4。

上向流反硝化深床滤池 2020 年 11 月—12 月的 TN 处理效果见图 5。

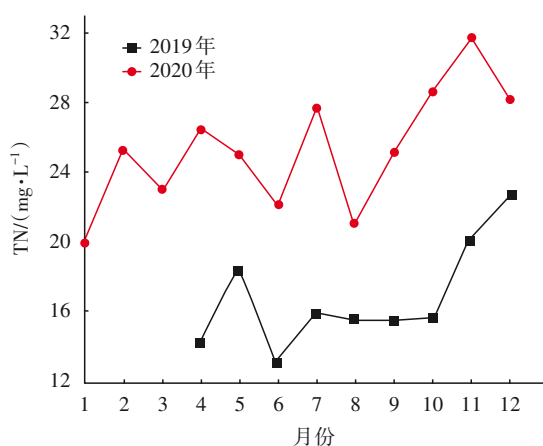
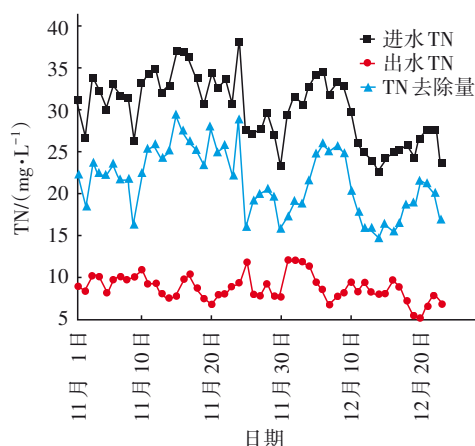
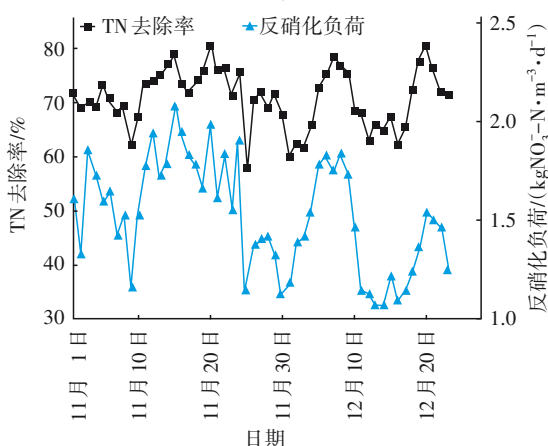


图4 上向流反硝化滤池提质增效后进水TN浓度

Fig.4 Influent TN of upflow denitrification filter after improving quality and efficiency



a. 进、出水TN



b. TN去除率及反硝化负荷

图5 上向流反硝化深床滤池11月和12月的TN处理效果

Fig.5 TN treatment effect of upflow denitrification deep bed filter in November and December

从运行数据可以看出,进水TN为22.7~38.2 mg/L,经深床滤池处理后出水TN稳定低于12 mg/L,

去除率高达57.5%~80.6%。与此同时,还发现滤池TN去除量最高达29.4 mg/L,相应的反硝化负荷达到2.08 kgNO₃⁻-N/(m³·d)。即使在进水TN超设计值90%的情况下,出水TN依旧能稳定低于12 mg/L,说明上向流反硝化滤池脱氮效率较高。因此,针对一些生化池TN处理效果不理想且具备改造条件的工程,上向流反硝化深床滤池非常适合作为其深度处理工艺。同时,该深床滤池脱氮能力较强,能够为后续再次提标升级留有充分的空间。

此外,上向流反硝化深床滤池采用石英砂的固定滤床,具有较好的同步脱氮除磷功能,运行过程中向SBR池投加除磷剂,经上向流反硝化滤池截留过滤,TP去除率达到20%~40%,出水TP能够稳定低于0.3 mg/L。同时上向流反硝化滤池能够进一步确保出水达标排放,出水COD≤30 mg/L、BOD₅≤6 mg/L、SS≤5 mg/L。反硝化深床滤池进、出水COD、BOD₅、SS和TP数据见表3。

表3 深床滤池进、出水COD、BOD₅、SS及TP数据Tab.3 COD, BOD₅, SS and TP of influent and effluent of deep bed filter mg·L⁻¹

日期	COD		BOD ₅		SS		TP	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
9月1日	30	11	5.0	2.1	11	4	0.28	0.22
9月2日	28	15	8.0	4.2	12	5	0.25	0.18
9月3日	26	18	7.5	4.9	10	4	0.38	0.24
9月4日	22	14	6.2	3.5	15	5	0.30	0.19
9月5日	27	10	7.0	2.5	18	5	0.24	0.15
9月6日	36	21	5.4	2.8	14	4	0.35	0.21
9月7日	25	16	7.8	4.6	12	5	0.30	0.20

5 技术经济分析

该提标改造工程新增精细格栅和上向流反硝化滤池模块化装备,总投资约5 500万元(含土建费用),吨水造价550元,占地面积1 300 m²。新增装机容量600 kW,运行功率480 kW,吨水新增电费约0.05元/m³;乙酸钠消耗量为4 187.4 t,市场价按1 600元/t计,新增吨水乙酸钠费用为0.177元/m³,共计新增吨水直接运行费用为0.227元/m³。

6 工艺及模块化装备特点

① 具有同步脱氮除磷功能,脱氮效率高,出水TN可低至5 mg/L。上向流反硝化深床滤池采用底部进水、上部出水的上向流过滤方式,利用管道封闭式进水,解决了下向流滤池进水时跌水增加溶

解氧浓度的问题,通过控制较低的溶解氧浓度,可有效提高脱氮效率。根据工程应用情况,上向流反硝化深床滤池可通过过滤实现SS和TP的去除,经反硝化作用去除TN,其出水可稳定达到 $TN \leq 10 \text{ mg/L}$,且通过工程试验验证,处理出水TN可低至 5 mg/L 。

② 进水不复氧,碳源投加量可节省30%以上。根据工程经验总结,反硝化滤池碳源投加量的计算公式^[5-6]为:碳源投加量 $=2.86 \times \text{去除 } NO_3^- \text{ 量} + 1.71 \times \text{去除 } NO_2^- \text{ 量} + \text{去除 } DO \text{ 量} + \text{反冲洗损失的碳源}$ 。常规下向流反硝化深床滤池因进水跌落充氧,会造成碳源大量浪费,同时因DO浓度高而滤料繁殖大量异养菌,导致频繁冲洗,也会造成碳源流失;上向流反硝化深床滤池进水与空气隔绝,避免了复氧过程。实践发现,相较于下向流反硝化深床滤池,上向流反硝化深床滤池碳源投加量可节省30%以上。

③ 纳污量大,反洗周期长,可省去高效沉淀池。上向流过滤是基于“反粒度”理论,在过滤过程中,水流由下而上先通过粒径较粗的滤层而后通过较细的滤层,整个滤层截污均匀,大大提高了滤料层的纳污量,延长了反冲洗周期,根据一些工程项目的经验,上向流反硝化滤池反洗周期通常为24~48 h,相对应的水头损失达到3 m左右。而下向流滤池大部分截污集中在表层50 cm,没有发挥下部的截留作用。试验数据表明,同等条件下,上向流滤池的纳污量为下向流的5倍以上^[7]。因此,上向流反硝化深床滤池在纳污量提高的基础上,延长了反冲洗周期,可以更好地发挥同步除磷性能,在用地紧张的污水厂提标项目中,可省去高效沉淀池,大大节省投资成本。

④ 无需驱氮设施,且进一步保证微生物活性。在下向流反硝化深床脱氮过程中,点状氮气泡会聚集在介质的表层,形成“气堵”现象,滤速低,必须借助外力进行驱氮,恢复水头。根据相关工程经验,下向流反硝化深床滤池通常每隔2~5 h开启反冲洗水泵2~3 min驱氮一次,在驱氮过程中,悬浮微生物和部分附着型微生物会随着水流流失而减弱其反硝化效果。而上向流反硝化深床滤池产生的氮气释放与水流同向,氮气能够得到及时排放,可有效避免气阻。因此,上向流反硝化深床滤池滤速可适当提高,无需进行驱氮,简化了设备与操作程序,避免了驱氮过程中对微生物冲击及微生物总

量的影响,进一步保证了微生物活性,总氮去除效率更高。

⑤ 碳源投加的精准控制。上向流反硝化深床滤池碳源的投加采用模糊控制法,设置总进水量、进出水溶解氧浓度及进出水硝酸盐氮含量的反馈,通过建立数学模型动态控制碳源加药量。在保证出水COD、 BOD_5 达标的前提下,能精确控制总氮的去除。

⑥ 独特的布水布气系统,反洗更均匀。反硝化深床滤池应用于深度处理,需要投加碳源及除磷剂,截留的固体杂质多,产泥相对增加,因此对反冲洗系统的技术要求较高。上向流反硝化滤池运用独特的布水布气技术,采用中阻力布水、大阻力布气的上向流多功能滤管实现过滤的布水、反洗布水及反洗布气,通过合理地控制开孔率,能确保布水布气更加均匀,反冲洗无死区,进而有效防止滤料堵塞。

⑦ 采用模块化装备的建造模式。将上向流反硝化深床滤池工艺设计成标准化设备,统一尺寸,模块化装配,大大节省工期,安装便捷,易于搬迁,可循环利用,并可根据近期、远期处理规模大小,分期灵活配置,不受安装场地及施工周期限制。同时,采用模块化装备的建造模式,将其与园林绿化结合,打造成公园化嵌入式污水处理厂,整体景观效果可媲美地下式污水处理厂。

⑧ 采用信息管理平台监控智能模块化装备运行。智能模块化水处理装备信息管理平台,对于提高模块水处理装备智能化水平起着至关重要的作用。智能模块化水处理装备信息管理平台分为本地上位机控制系统、远程上位机控制系统、下位机控制系统和通信系统、远程手机APP控制客户端。远程上位机控制系统采用服务器,安装数据库管理软件、西门子SIMATIC WinCC组态软件,运用软件制作人机界面,形成上位机控制系统,将所有项目控制系统集中到一套信息管理平台,实现对项目的远程管理、远程诊断、远程维护、数据存储及管理、数据分析、程序在线升级,同时系统还支持网页及手机APP在线查看项目运行数据。采用该信息管理平台,能够让模块化装备的智能化水平达到“无人值守、远程遥控、智能思考”的目标。

7 结语

① 广东省某水质净化厂一期工程提标改造

工程增加上向流反硝化深床滤池深度处理后,污水处理厂出水能够稳定达到 $\text{COD} \leq 30 \text{ mg/L}$, $\text{BOD}_5 \leq 6 \text{ mg/L}$, $\text{TN} \leq 12 \text{ mg/L}$, $\text{SS} \leq 5 \text{ mg/L}$, $\text{TP} \leq 0.3 \text{ mg/L}$, 且最大的 TN 去除量高达 29.4 mg/L , 相应的反硝化负荷达到 $2.08 \text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。同时,在进水 TN 为 $10 \sim 20 \text{ mg/L}$ 时,其出水总氮可低至 5 mg/L 以下。

② 上向流反硝化深床滤池脱氮除磷效果好,纳污量大,无需设置高效沉淀池,可用于污水处理厂提标扩容或新建项目,对于场地受限的污水处理厂特别适用。

③ 上向流反硝化深床滤池进水不存在跌落充氧的现象,可以有效避免进水溶解氧二次提升,碳源的利用率高,再完美结合精准的碳源投加控制方式,可比传统反硝化深床滤池节省碳源投加量 30% 以上。

参考文献:

- [1] 杨敏,孙永利,郑兴灿,等. 不同外加碳源的反硝化效能与技术经济性分析[J]. 给水排水, 2010, 36(11): 125-129.
YANG Min, SUN Yongli, ZHENG Xingcan, et al. Denitrification efficiency and techno-economic analysis of different exotic additional carbon source [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(11): 125-129 (in Chinese).
- [2] 李文龙,杨碧印,陈益清. 反硝化滤池用于城市污水深度处理的研究进展[J]. 广东化工, 2016, 43(16): 151-153.
LI Wenlong, YANG Biyin, CHEN Yiqing. Research progress of denitrification filter in urban advanced wastewater treatment [J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(16): 151-153 (in Chinese).
- [3] 严国奇,张丽丽. 七格三期污水处理厂反硝化深床滤池的调试与运行[J]. 中国给水排水, 2017, 33(16): 127-132.
YAN Guoqi, ZHANG Lili. Commissioning and operation of deep-bed denitrification filter in Qige phase III wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(16): 127-132 (in Chinese).
- [4] 伍波,叶昌明. 上向流反硝化深床滤池模块化标准件用于大型污水厂[J]. 中国给水排水, 2019, 35(18): 99-101.
WU Bo, YE Changming. Application of upflow denitrification deep bed filter modular standardized equipment in large WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18): 99-101 (in Chinese).
- [5] 刘金瀚,白宇,林海,等. 反硝化生物滤池用于污水深度脱氮研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(21): 26-29.
LIU Jinhan, BAI Yu, LIN Hai, et al. Study on denitrifying biofilter for advanced wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(21): 26-29 (in Chinese).
- [6] 杜创,雷振,张铁源. 深床滤池在污水厂地表Ⅳ类水提标改造中的应用[J]. 中国给水排水, 2017, 33(8): 99-103.
DU Chuang, LEI Zhen, ZHANG Tiejuan. Application of deep bed filter in WWTP upgrading project to meet class IV standard of surface water [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(8): 99-103 (in Chinese).
- [7] 谢社平. 上向流过滤应用技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2001.
XIE Sheping. Research on Application Technology of Upflow Filtration [D]. Changsha: Hunan University, 2001 (in Chinese).

作者简介:伍波(1990-),男,湖南长沙人,硕士,中级工程师,从事水处理设计与研究工作。

E-mail:wubo201606@dingtalk.com

收稿日期:2020-12-16

修回日期:2020-12-29

(编辑:衣春敏)