

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.12.023

自(异)养脱氮在低 C/N 污水处理厂的应用实践

蒋富海

(中持水务股份有限公司, 北京 100192)

摘 要: 低 C/N 污水处理厂面对碳氮高标准尾水提标要求时,宜采用异养反硝化与自养脱氮滤池的串联。自养脱氮滤池的脱氮效率易受系统进水水温、DO、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 负荷等影响,当进水水温为 25 ~ 30 °C、 $\text{NO}_3^- - \text{N} < 15 \text{ mg/L}$ 、 $\text{HRT} > 20 \text{ min}$ 时,滤池脱氮负荷达到 0.56 kgTN/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$),脱氮率约 60%,对应活性滤料消耗量与 TN 削减量之比为 3.9,进水 DO 超过 2 mg/L 时会导致部分硫核滤料被氧化而无效消耗,可辅助投加 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 作为电子供体。选用粒径为 2.0 ~ 3.5 mm 的改性硫核活性滤料,辅以适量砂料的双料复合滤层,以确保 TN 和 SS 的协同削减,且自养滤料节药效益明显。自养脱氮滤池需长期关注低水温时的脱氮效率,以及 SO_4^{2-} 、 H_2S 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 等副产物是否积累。自养滤料的微生物优势菌落为 *Thiobacillus* 和 *Sulfurimonas* 两类硫杆菌,二者丰度之和超过 50%。

关键词: 低 C/N 比; 异养反硝化; 硫自养反硝化; 自养脱氮滤池; 深度脱氮除碳

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)12-0124-08

Application Practice of Autotrophic (Heterotrophic) Denitrification in a WWTP with Low C/N Ratio Influent

JIANG Fu-hai

(CSD Water Service Co. Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: It's recommended for the wastewater treatment plant (WWTP) with low C/N ratio influent to use cascade process of heterotrophic denitrification and autotrophic denitrification filter, so as to achieve high discharge standard. Nitrogen-removal efficiency of autotrophic denitrification filter is easily affected by influent temperature, DO, and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ load. When influent temperature is within 25 to 30 °C, influent $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration is less than 15 mg/L, and HRT of filter is above 20 minutes, the filter's denitrification-load could be 0.56 kgTN/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$) and TN removal efficiency reached 60%, meanwhile the ratio of active media consumption to TN reduction is about 3.9. When the influent DO exceeded 2 mg/L, the sulfur-based filter media would be partly oxidized and consumed inefficiently. Thus, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ could be added as an auxiliary electron donor. Activated sulfur-based autotrophic filter media with particularly size of 2.0 to 3.5 mm, supplemented with double layer composite quartz-sand, was selected to ensure the collaborative reduction of TN and SS pollutants, and to attain obvious benefits of chemical saving by using the autotrophic filter media. Long term attention should be paid to the nitrogen removal efficiency at low water temperature and whether the by-products such as SO_4^{2-} , H_2S and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ were accumulated in the autotrophic denitrification filter. The dominant microbial colonies of autotrophic filter media were *Thiobacillus* and *Sulfurimonas*, and the abundance of both was more than 50%.

Key words: low C/N ratio; heterotrophic denitrification; sulfur-based autotrophic denitrification; autotrophic denitrification filter; enhanced nitrogen and carbon removal

“十三五”末期,各地将污水厂提质消污与工程提标挂钩,在深度处理单元常采用异养反硝化(如深床反硝化滤池)来强化脱氮效能。通过精细化调控加药,控制外碳源的投加量与脱氮需求量相匹配,以避免碳源药剂残余引起 COD 反弹风险。异养反硝化滤池以有机物作为能源和电子供体,近年来也有研究以无机碳为能源、以还原态的无机物(硫、铁、氢等)作为电子供体的自养反硝化固定床技术,以期实现基础研究向工程化应用的转化。随着硫等改性功能新材料的开发应用,希冀探究硫自养脱氮滤池与二级异养反硝化相辅相成,共同构建脱氮除碳与高标尾水的技术保障和应用场景。

1 项目概况

1.1 设计水质与工艺流程

某工业园区污水处理厂的上游重点涉水企业包括淀粉加工、生物制药、光伏产品等,设计处理规模 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,于 2017 年开工建设,2018 年 6 月通水

达标运行。设计进、出水水质见表 1,未列进水指标需达到《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015),出水水质执行 GB 18918—2002 的一级 A 标准,其中 $\text{COD} \leq 40 \text{ mg/L}$,2019 年 10 月尾水提标至《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准 IV 类,自 2020 年 1 月起执行。工艺流程见图 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

项目	进水水质	提标前出水水质	提标后出水水质
$\text{COD}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	400	40	30
$\text{BOD}_5/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	200	10	10
$\text{NH}_3 - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	25	5(8)	1.5
$\text{TN}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	65	15	15
$\text{TP}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	8	0.5	0.3
$\text{SS}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	200	10	10
pH 值	6~9	6~9	6~9

注: 括号内为温度 $\leq 12 \text{ }^\circ\text{C}$ 时指标。

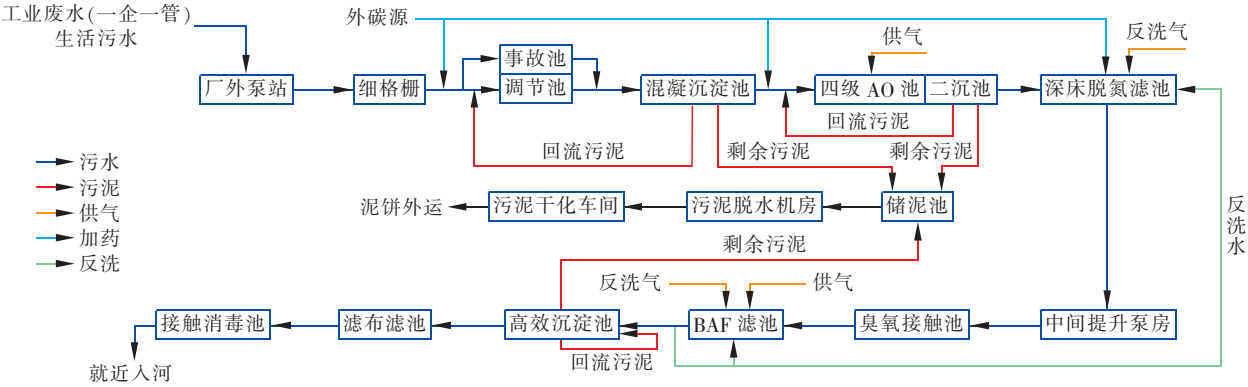


图 1 污水处理工艺流程

Fig. 1 Flow chart of wastewater treatment process

核心处理单元的设计参数见表 2。

表 2 核心单元的设计参数

Tab. 2 Design parameters of core units of the WWTP

项目	参数	数量
调节池	HRT = 5 h	1 组
混凝沉淀池	HRT = 2 h; 表面负荷为 $1.50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	两系列
多级 AO 生化池	厌氧区: HRT = 1 h; 缺氧区(合计): HRT = 8 h; 好氧区(合计): HRT = 11 h	两系列(四级 AO)
深床脱氮滤池	单格过滤面积 78 m^2 , 滤速 5.4 m/h (强制滤速 7.1 m/h); 石英砂滤料粒径 $2 \sim 3 \text{ mm}$ (填充厚度 1.85 m)	1 组 4 格

1.2 脱氮滤池的技术改造

为评估自主研发的改性硫核活性滤料作为深度脱氮滤池的自养功能性材料的技术可行性和经济性,并考察设计、运行及影响参数,以探究市场应用的合理性,基于现状工程尝试优化,将现有深床脱氮滤池由异养型改为自养型脱氮,分两阶段实施改造:于 2019 年 8 月完成其中一格(1#自养格)改造,将上部原 1.65 m 的砂滤料更换为改性硫核活性滤料(粒径 $2.0 \sim 3.5 \text{ mm}$),仍保留底部 0.20 m 砂滤料,以考察双料复合滤床的 SS 截留效果;基于 1#自养

格的自养脱氮对比效果论证后,于2019年12月完成其余3格改造(见图2、3)。以下实践数据与分析均源自1#自养格与原砂滤格(2#砂滤格,其间未投加外碳源)同步运行一个月的对比论证。

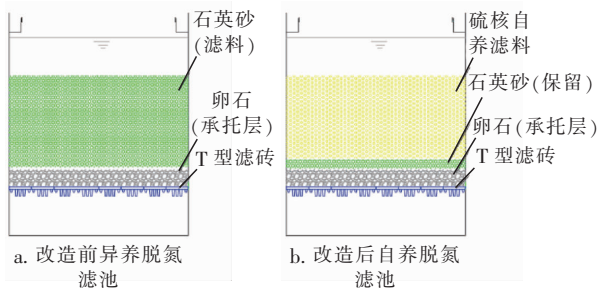


图2 自养脱氮滤池改造示意

Fig. 2 Transformation of autotrophic denitrification filter



图3 硫核活性滤料及其填充

Fig. 3 Activated sulfur-based filter media and its filling

自养脱氮滤池初始启动时,从生化池缺氧区直接取活性污泥作为接种污泥,分3批次投泥(每批次间隔1~2 d,便于与载体滤料充分接触附着挂膜),每次投加污泥量按滤料区容积填充,污泥浓度1 000~1 500 mg/L,并投加少量活化菌液,经过约两周的启动驯化,基本挂膜完成。

2 活性污泥异养反硝化的处理效果

2.1 来水特性

该污水厂实际处理水量为 $(2.2 \sim 2.5) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其中上游工业废水占比超75%,经企业预处理设施降解后,COD、氨氮等已处于极低水平,污水厂的进水呈现“两低一高”(低COD寡碳营养性,<80 mg/L;低氨氮,<5 mg/L;高硝氮, $\geq 30 \text{ mg/L}$)的典型特点。

2.2 运行效果

鉴于进水COD浓度偏低且可生化性极差,难以被微生物合成或分解代谢所用,为确保异养生物脱氮效果,在生化池的A1/A2首端投加外碳源,通过

小试优选短中链的液体碳源,兼顾脱氮与硝化微生物生长的协同需求,调控生化出水TN为8~15 mg/L,以期后续脱氮滤池单元提供基本的硝态氮底物。

COD、TN的沿程变化见图4。

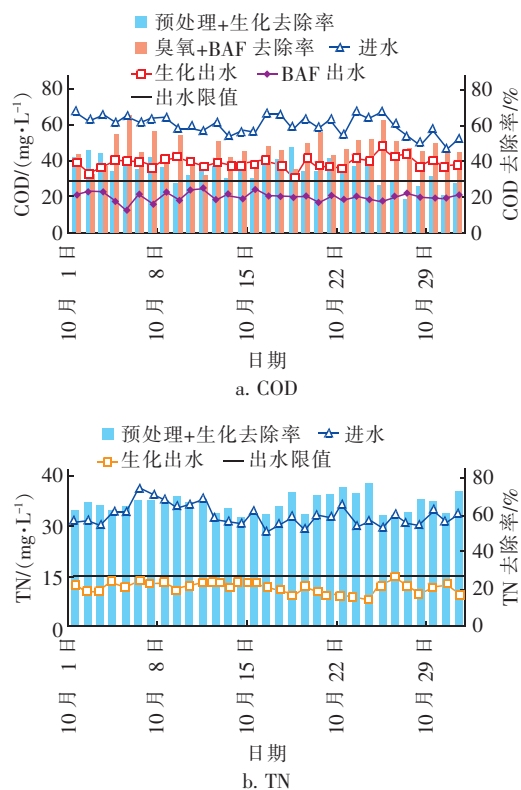


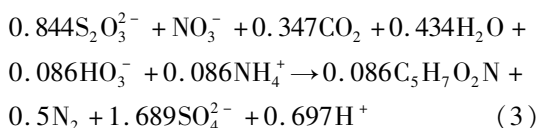
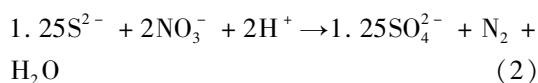
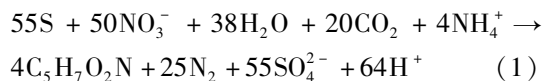
图4 COD、TN的沿程变化

Fig. 4 Change of COD and TN concentration

3 新型自养脱氮滤池的应用实践

3.1 反应机理

自养反硝化,即利用无机碳作为能源,以无机物(硫、铁、氢)作为电子供体,将硝态氮转化为氮气的过程。脱氮生物滤池可采用异养型、自养型或混合营养型反硝化进行生物脱氮。硫自养反硝化,以 S 、 S^{2-} 、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 等硫系物质作为电子供体得以完成^[1-2],其反应式^[1,3-4]如下:



3.2 运行效果

① 污染指标

脱氮滤池内1#、2#两格滤床的进、出水TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、SS在1个月的变化见表3、图5~7。当滤池进水TN为7.5~14.5 mg/L(均值11.5 mg/L)、 $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$ 为0.62~0.97(均值0.82)、COD/TN为3.8时,相较于2#砂滤格,1#自养格出水TN为2.2~7.6 mg/L(均值5.1 mg/L),TN平均削减超过5 mg/L,复合滤料呈现TN与SS的协同削减效能。

表3 脱氮滤池1#自养格的污染物变化

Tab.3 Variation of pollutants in 1# unit of the autotrophic denitrification filter

项目	TN	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	SS
脱氮滤池进口/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	7.5 ~ 14.5 (平均:11.5)	5.7 ~ 12.6 (平均:9.0)	13.3 ~ 27.0 (平均:21.0)
滤池1#自养格出 口/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	2.2 ~ 7.6 (平均:5.1)	1.1 ~ 5.8 (平均:3.3)	3.0 ~ 11.0 (平均:6.6)
滤池1#自养格 平均去除率/%	56	64	68

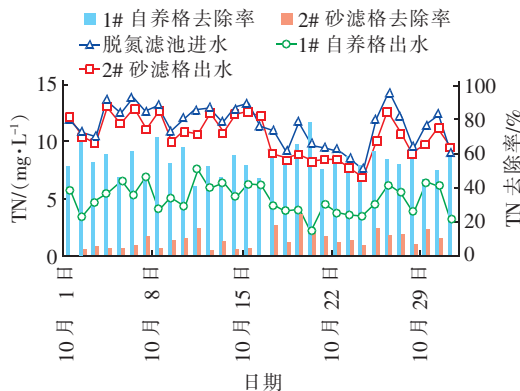


图5 脱氮滤池内TN的对比

Fig.5 Comparison of TN in the autotrophic denitrification filter

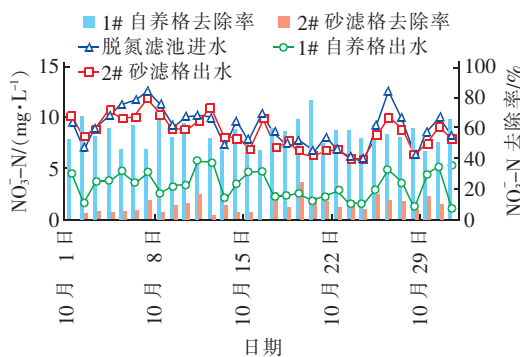


图6 脱氮滤池内 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的对比

Fig.6 Comparison of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in the autotrophic denitrification filter

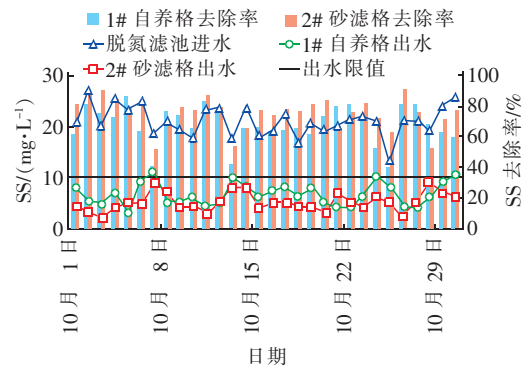


图7 脱氮滤池内SS的对比

Fig.7 Comparison of SS in the autotrophic denitrification filter

② 效能指标

脱氮滤池1#自养格的脱氮负荷(以TN计)、硫酸盐产生量与TN削减量的比率、活性滤料消耗量与TN削减量的比率变化见图8。

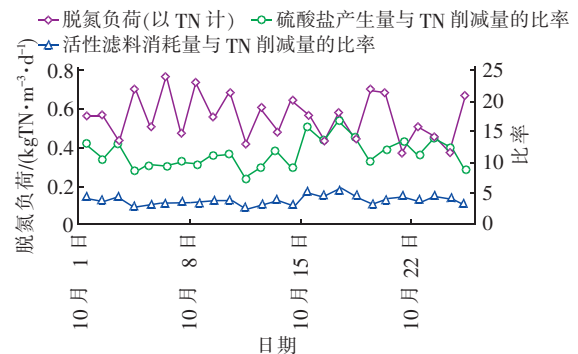


图8 脱氮滤池1#自养格的脱氮负荷和相关变量的比率

Fig.8 TN removal loading and ratio of related variables in 1# unit of the autotrophic denitrification filter

由图8可以看出,脱氮负荷为0.37~0.76 $\text{kgTN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,均值0.56 $\text{kgTN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$;硫酸盐产生量与TN削减量的比率为7.5~18.7(均值11.7),按硫酸盐产生量与活性滤料消耗量比率约为3.0计,则活性滤料消耗量与TN削减量的比率为2.5~6.2(均值3.9)。

③ 关联指标

脱氮滤池1#自养格的 SO_4^{2-} 、 S^{2-} 、碱度、pH值变化见图9。随着硫核活性滤料的消耗, SO_4^{2-} 浓度增幅为40~112 mg/L(均值75 mg/L), S^{2-} 无明显累积(平均增幅仅6 $\mu\text{g}/\text{L}$,出水最高浓度仍在0.05 mg/L以下)。碱度、pH值分别平均下降75 mg/L、0.45。脱氮滤池1#自养格的DO、水温及滤层纵深的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 污染变化见图10。

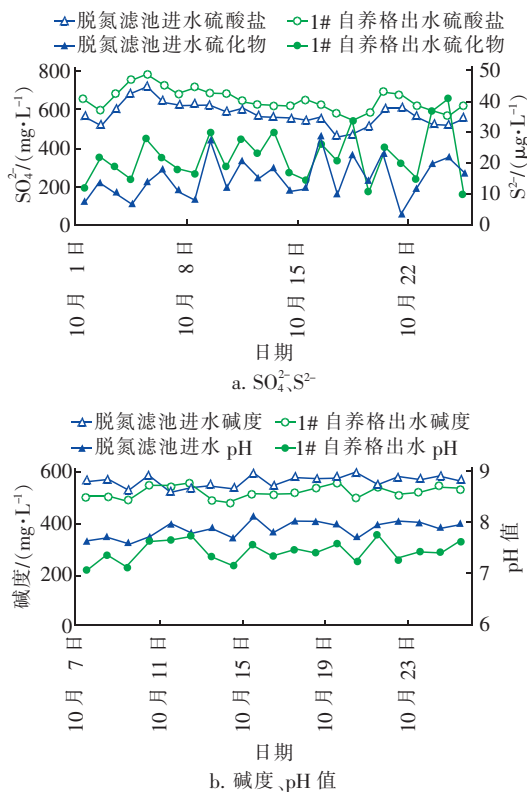
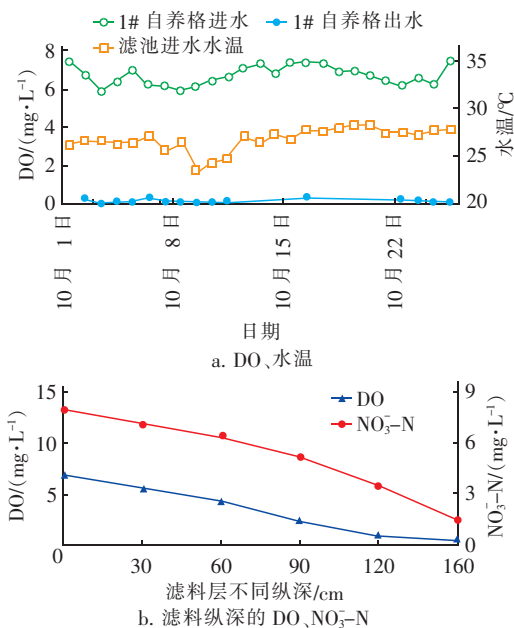


图 9 脱氮滤池 1#自养格的关联指标变化

Fig. 9 Variation of several related indexes in 1# unit of the autotrophic denitrification filter

图 10 脱氮滤池 1#自养格的 DO、水温及滤料纵深 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的变化Fig. 10 Variation of DO, water temperature & $\text{NO}_3^- - \text{N}$ of different depth of filter-media in 1# unit of the autotrophic denitrification filter

受二级生化极低污染负荷的影响,脱氮滤池进口 DO 浓度相对偏高,废水进入滤料纵深而不断被消氧,部分硫核滤料发挥还原剂消氧的辅助功能^[5], $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 呈现同向递减变化,推测在硫核活性滤料内外膜上产生脱氮反应的微环境,从而实现硝酸盐不断被还原。针对脱氮滤池进水高 DO 的情况,其间在 1#自养格连续 5 h 投加适量 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 溶液作为辅助电子供体,瞬时连续采样的结果显示:当 1#滤格进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 13 ~ 15 mg/L 时,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 降至 2 ~ 3 mg/L,即滤池进口辅以硫代硫酸盐药剂时,脱氮效率提升 15% ~ 20%。

4 讨论与分析

4.1 不同反硝化滤池与二级生化的联合

二级生化+脱氮滤池的常见反硝化串级工艺见图 11。其中自养或混合营养的脱氮滤池,可采用单一或复合滤料。采用异养协同硫自养反硝化处理含硝氮废水时,可以平衡酸碱度,降低污泥产量,提高脱氮效率,降低脱氮运行费用,减少 NO_2^- 和 SO_4^{2-} 的累积量^[6-9]。

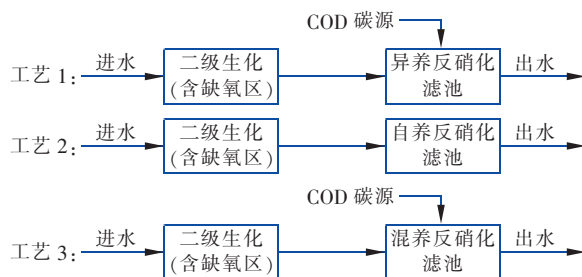


图 11 深度脱氮的常见反硝化串级工艺

Fig. 11 Common denitrification process for advanced TN removal

针对不同脱氮浓度(1 ~ 10 mg/L)需求,基于经验 C/N 投配比[(5 ~ 10) : 1],预测采用异养脱氮滤池时其出口的 COD 增量情况,如图 12 所示。

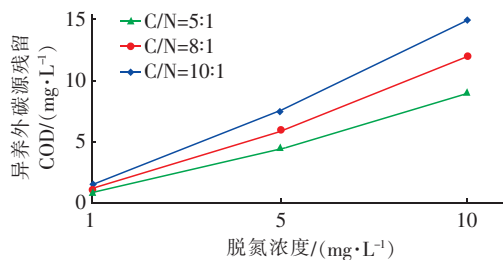


图 12 外碳源对异养脱氮滤池的 COD 贡献趋势

Fig. 12 Contribution trend of external carbon source to COD increment of heterotrophic denitrification filter

由于外碳源并不能完全作为电子供体被代谢消耗,假设残留比为 15% 时,则外碳源贡献 COD 可达 9~15 mg/L,因此单独采用异养反硝化滤池作为深度单元时,需注意外碳源带来的 COD 残留影响。

4.2 滤料上反硝化菌属群落分布

针对 1# 自养格脱氮滤池中下部的滤料层附着生物采样开展高通量测序,结果见图 13,显示具有优势的 *Thiobacillus* 丰度为 42.5%,*Sulfurimonas* 丰度为 9.7%,这与相关研究^[10-11]相近,即硫自养反硝化中,*Thiobacillus* 和 *Sulfurimonas* 是代表性菌属,占据较多丰度,合计超过 50%。

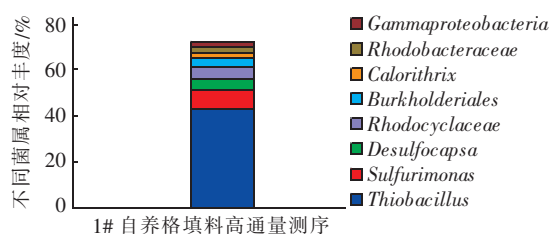


图 13 1# 自养滤料的高通量测序结果

Fig. 13 High throughput sequencing results from microbiological samples of 1# unit of the autotrophic denitrification filter

4.3 自养反硝化滤池的核心设计参数

4.3.1 HRT 与脱氮负荷

脱氮滤池的脱氮效率与反应 HRT 具有较大关联,HRT 过大时基建投资高,HRT 过小时脱氮效率低。本项目设计 HRT 约 20 min,平均脱氮负荷为 0.56 kgTN/(m³·d),其中自养滤料的部分滤层因 DO 偏高而无效消耗。为确保深度脱氮效果,一般设计 HRT 为 20~45 min。

4.3.2 自养滤料选择

相关研究采用硫铁矿(FeS₂)、硫磺/硫铁矿、硫/铁屑、硫/石灰石等作为硫自养反硝化的反应基料^[12-13]。2020 年国家发改委将复合活性矿物合成一体化材料(废弃物再生),实现自养(硫循环)、异养(碳氮循环)反硝化的协同脱氮,推荐为城镇污水处理高效脱氮的绿色推广技术。硫核自养活性滤料的粒径和比表面积对于脱氮也很重要,粒径过小比表面积大、传质快但容易被过流或反洗冲刷;粒径过大过流稳定但传质相对弱且 SS 截留作用差,硫滤料粒径为 2.8 mm 以下仍能取得较好脱氮效果^[7,14]。

4.3.3 核心仪控配备

为调节自养脱氮滤池的近恒水位,避免滤池内跌氧,出水阀门应采用可调节阀,出水阀的开度与滤

池内液位信号进行 PID 调节控制。针对反洗程序合理设置,宜采用气水混洗+水洗方式,并有水洗驱氮环节。进出水选择性配备 NO₃⁻-N、SO₄²⁻、pH 在线监测仪表,以及补碱(如碳酸氢盐)、辅助电子供体(硫代硫酸钠等)备用投药系统。

4.4 自养反硝化滤池的进水影响因子

4.4.1 适宜进水水温

本项目处理工业混排废水,其进水水温相对较高,不具备低温工况的考察条件,后续将完善针对低温下的应用效果评估。根据相关研究,水温因素对二级出水的硫自养反硝化脱氮效果影响较大^[15];低温条件下,单质硫自养反硝化脱氮作用会受到明显的抑制,可在混合菌系统中加入硫代硫酸盐或乙酸盐提升系统还原硝酸盐的速率^[16]。

4.4.2 进水 DO 抑制性

脱氮滤池 HRT 较短,若其进水挟带过高的 DO (>2 mg/L)时,滤料层中上部为好(兼)氧环境,由此造成低价态滤料发生氧化反应而无效消耗,因此针对进水 DO 的控制与消除(建议 DO <2 mg/L),是系统脱氮的关键影响因素。可通过 Na₂S₂O₃ 替代有机碳源辅作电子供体,且不至于 COD 反弹。

4.5 自养反硝化滤池的运行调控

4.5.1 系统启动驯化

滤池初次启动时可进行两三批次的污泥接种(直接取自生化系列活性污泥混合液),若冬季低温启动时,则少量补充活化菌种,以利于系统快速启动与驯化,通过 NO₃⁻-N 及 DO 的削减水平判断启动驯化是否成熟。

4.5.2 自养活性滤料的消耗核计与补料

本项目活性滤料消耗量与 TN 削减量的比率约为 3.9,略高于理论比。自养载体的定量消耗计量,可通过 1~2 个月定期探测池内滤料层厚度的降幅、辅以 SO₄²⁻ 的产量(折合自养活性滤料消耗估值)进行评估。当脱氮效率明显降低时,通过降低液位、露出滤料表层,机械化吊装卸投料,应确保滤料在滤池表层摊铺均匀、避免局部堆料或短流。自养脱氮滤池即使无脱氮需求,但当进水底物含有高 DO 或 NO₃⁻-N 时滤料也会无效消耗,因此自养脱氮滤池在设计时宜保留旁路的超越管线。

常态化开展 SO₄²⁻、NO₃⁻-N 手工检测,不定期开展 S²⁻、NO₂⁻-N 检测,避免硫酸盐还原菌(SRB)带来的硫化氢以及因反硝化不完全造成的 NO₂⁻-N

累积问题。各地污水厂现行排放标准或 GB 3838—2002 中并未限定 SO_4^{2-} 指标,但仍需长期关注 SO_4^{2-} 、 H_2S 带来的中毒、金属腐蚀或结垢隐患。

4.5.3 驱氮及反洗操作

建议以高速水反洗或气水混洗为主^[5],以强化驱(释)氮作用,恢复过滤水头以及脱氮性能,单独气洗的反洗周期应相对较长、单次也需控制气洗强度和气洗历时,避免过度气洗冲刷造成滤料自养生物膜流失,以及带来滤料层的高 DO 穿透。

4.6 经济效益对比

基于每 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 处理量时,脱氮滤池改造为硫核活性自养滤料,其材料费较石英砂滤料同比增加 25 ~ 32 万元;对去除 $\geq 5 \text{ mg/L}$ 的 TN 目标时,同比于异养脱氮滤池的投加碳源(以复合碳源或 30% 乙酸钠计),硫核活性自养滤料首年即可实现 30 万元以上的节约经济效益,可冲抵其一次性填充的材料增幅费用。运行费测算对比见表 4。

表 4 滤池不同电子供体的运行费用对比

Tab.4 Comparison of operating costs of different electronic donors for the denitrification filter

项 目	硫核活性滤料 (自养电子供体)	异养有机碳源 (异养电子供体)	
		复合碳源	30% 乙酸钠
去除单位 TN 的吨水 费用/(元·g ⁻¹ N)	0.01 ~ 0.015	0.015 ~ 0.02	0.03 ~ 0.035
年费用(基于 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 处理量、 去除 5 mg/L 的 TN 时)/万元	18 ~ 27	27 ~ 37	55 ~ 64

5 结论

低 C/N(低 COD、高硝氮)污水处理厂的深度脱氮除碳(尾水 TN $\leq 10 \text{ mg/L}$, COD $\leq 30 \text{ mg/L}$),宜采用二级异养反硝化与自养脱氮滤池的串联,将砂滤料改造为硫核自养或混合营养型滤料。

自养脱氮滤池由于 HRT 短,脱氮效率易受进水水温、DO、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 进水负荷等影响,当进水水温为 25 ~ 30 °C、 $\text{NO}_3^- - \text{N} < 15 \text{ mg/L}$ 、系统 HRT 在 20 min 以上时,其脱氮负荷约 $0.56 \text{ kgTN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,TN 削减浓度超过 5 mg/L,脱氮率近 60%,活性滤料消耗量与 TN 削减量的比率均值约为 3.9。进水 DO $> 2 \text{ mg/L}$ 时会导致部分硫核滤料被氧化而无效消耗,可投加 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 替代有机碳源辅作电子供体提高脱氮效率。

宜选用粒径为 2.0 ~ 3.5 mm 的改性硫核活性滤料、辅以适量砂料的双料复合滤层,以确保 TN 和 SS 的协同削减,相较于异养有机碳源,自养硫核活性滤料节约效益明显。

自养脱氮滤池需关注低温时的脱氮效率,以及 SO_4^{2-} 、 H_2S 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 副产物是否积累。

自养滤料的微生物菌落以 *Thiobacillus*、*Sulfurimonas* 两类硫杆菌为主,合计丰度超过 50%。

参考文献:

- [1] 周娅,买文宁,代吉华,等. 硫代硫酸钠联合硫铁矿自养反硝化脱氮性能[J]. 环境科学,2020,40(5): 2081 - 2086.
ZHOU Ya, MAI Wenning, DAI Jihua, et al. Nitrogen removal performance of a sulfur/pyrite autotrophic denitrification system[J]. Environmental Science, 2020, 40(5): 2081 - 2086 (in Chinese).
- [2] 范军辉,郝瑞霞,LIU Lei,等. SCSC - S/Fe 复合系统脱氮除磷途径及微生物群落特性[J]. 中国环境科学,2017,37(4): 1358 - 1365 (in Chinese).
FAN Junhui, HAO Ruixia, LIU Lei, et al. Way of nitrogen and phosphorus removal and microbial community characteristics for SCSC - S/Fe[J]. China Environmental Science, 2017, 37(4): 1358 - 1365 (in Chinese).
- [3] 王海燕,曲久辉,雷鹏举. 电化学氢自养与硫自养集成去除饮用水中的硝酸盐[J]. 环境科学学报,2002,22(6): 711 - 715 (in Chinese).
WANG Haiyan, QU Jiuhui, LEI Pengju. Electrochemical hydrogen and sulfur autotrophic denitrification combined process in drinking water treatment[J]. Acta Science Circumstantiae, 2002, 22(6): 711 - 715 (in Chinese).
- [4] 邓旭亮,王爱杰,荣丽丽,等. 硫自养反硝化技术研究现状与发展趋势[J]. 工业水处理,2008,28(3): 13 - 16.
DENG Xuliang, WANG Aijie, RONG Lili, et al. Present state of the sulfur-autotrophic denitrification technique and its developing trend [J]. Industrial Water Treatment, 2008, 28(3): 13 - 16 (in Chinese).
- [5] 任争敏,刘雪洁,苏晓磊,等. 硫自养反硝化深度脱氮中试研究[J]. 中国给水排水,2016,32(9): 31 - 35.
REN Zhengmin, LIU Xuejie, SU Xiaolei, et al. Sulfur-based autotrophic denitrification process for advanced nitrogen removal[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(9): 31 - 35 (in Chinese).

- [6] 李祥,马航,黄勇,等. 异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究[J]. 环境科学,2016,37(7):2646-2650.
LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, *et al.* Characteristics of a combined heterotrophic and sulfur autotrophic denitrification technology for removal of high nitrate in water [J]. Environmental Science, 2016, 37(7):2646-2650 (in Chinese).
- [7] 周彦卿,郝瑞霞,刘思远,等. 新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷[J]. 环境科学,2017,38(10):4309-4314.
ZHOU Yanqing, HAO Ruixia, LIU Siyuan, *et al.* Improving nitrogen and phosphorus removal from reclaimed water using a novel sulfur/iron composite filler [J]. Environmental Science, 2017, 38(10):4309-4314 (in Chinese).
- [8] 李南锟,杜帅,刘莉,等. 葡萄糖对硫自养反硝化性能及微生物群落的影响[J]. 环境科学与技术,2019,42(12):8-12.
LI Nankun, DU Shuai, LIU Li, *et al.* Effects of glucose on nitrogen removal performance and microbial community in sulfur autotrophic denitrification system [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(12):8-12 (in Chinese).
- [9] 李军,关琳琳,王诗白,等. HABR系统实现固相异养与单质硫自养集成反硝化试验[J]. 环境科学研究,2014,27(3):314-319.
LI Jun, GUAN Linlin, WANG Shibai, *et al.* Solid-phase heterotrophic denitrification and sulfur autotrophic denitrification combined process in HABR system [J]. Research of Environmental Science, 2014, 27(3):314-319 (in Chinese).
- [10] 万东锦,李琦,刘永德,等. 硫自养反硝化过程中含硫副产物产生规律及微生物群落结构的分布[J]. 环境科学研究,2018,31(6):1152-1158.
WAN Dongjin, LI Qi, LIU Yongde, *et al.* Production rule of sulfur by-products in sulfur autotrophic denitrification and microbial community special distribution analysis [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(6):1152-1158 (in Chinese).
- [11] 任婕,林晓虎,刘伟,等. 硫自养反硝化强化人工湿地深度处理冷轧废水[J]. 环境工程,2018,36(4):7-10.
REN Jie, LIN Xiaohu, LIU Wei, *et al.* Cold rolling wastewater treatment by sulfur autotrophic denitrification enhanced constructed wetlands [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(4):7-10 (in Chinese).
- [12] 王旦梅,周琪. 废水中硝酸盐的硫自养反硝化工艺处理研究与进展[J]. 净水技术,2017,36(30):32-37.
WANG Danmei, ZHOU Qi. Research and process of sulfur-autotrophic denitrification process of nitrate removal in wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2017, 36(30):32-37 (in Chinese).
- [13] 钱凯,周圆,李激,等. 印染废水高标准排放组合工艺优化[J]. 环境工程学报,2019,13(8):1857-1865.
QIAN Kai, ZHOU Yuan, LI Ji, *et al.* High standard discharge combination process optimization for printing and dyeing wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(8):1857-1865 (in Chinese).
- [14] 马航,朱强,朱亮,等. 单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响[J]. 环境科学,2016,37(6):2235-2241.
MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, *et al.* Effect of element sulfur particle size and type of the reactor on start-up of sulfur-based autotrophic denitrification reactor [J]. Environmental Science, 2016, 37(6):2235-2241 (in Chinese).
- [15] 潘永月,周北海,马方曙,等. 印染废水处理厂二级出水的硫自养反硝化脱氮工艺[J]. 环境工程学报,2017,11(7):4073-4078.
PAN Yongyue, ZHOU Beihai, MA Fangshu, *et al.* Secondary effluent of dyeing wastewater treatment plant with sulfur autotrophic denitrification [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(7):4073-4078 (in Chinese).
- [16] 缪博,蒋永,刘攀攀,等. 低温对硫自养反硝化脱氮系统的影响及调控措施[J]. 中国给水排水,2019,35(5):105-109.
MIAO Bo, JIANG Yong, LIU Panpan, *et al.* Effect of low temperature on sulfur autotrophic denitrification and its improvement [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(5):105-109 (in Chinese).

作者简介:蒋富海(1983-),男,安徽怀宁人,硕士,高级工程师,从事污水运营技术研究与管理。

E-mail:jafeyh@163.com

收稿日期:2021-01-25

修回日期:2021-03-23

(编辑:衣春敏)