

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.02.020

厌氧-缺氧/滴滤/介质滤床处理油气站场生活污水

阚和科¹, 王云川², 黄文升¹, 吴义锋³, 曹海兵¹, 徐亦非¹,
顾 婧¹

(1. 中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257000; 2. 胜利油田鲁明油气勘探开发有限公司, 山东 东营 257000; 3. 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 针对油气站场生活污水水量小、间歇排水、水量波动大等特点,采用耦合物化、生化和生态处理的恒水位厌氧-缺氧/竖向脉冲滴滤/介质滤床的污水处理工艺,以干湿交替运行方式实现站场的污水处理。以东营市鲁源管理站生活污水处理为例,该工程污水处理量为 $5.0\text{ m}^3/\text{d}$,恒水位厌氧-缺氧池的水力停留时间为 1.2 d ;脉冲滴滤池水力负荷为 $6.3\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$;介质滤床水力负荷为 $0.5\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。经过启动驯化和冬季过渡阶段,系统稳定运行,原水COD、 NH_4^+-N 、TN、TP的平均浓度分别为 214.2 、 42.71 、 62.23 、 4.42 mg/L ,出水相应指标的平均浓度分别为 31.9 、 4.29 、 10.74 、 0.53 mg/L ,平均去除率分别为 85.1% 、 90.0% 、 82.7% 和 88.0% ,满足《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)的绿化用水标准和《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。

关键词: 油气站场; 生活污水; 厌氧-缺氧; 脉冲滴滤; 介质滤床

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)02-0120-06

Domestic Sewage Treatment of Oil and Gas Station by a Combined Process of Anaerobic-Anoxic/Pulse Trickling Filter/Medium Filter Bed

KAN He-ke¹, WANG Yun-chuan², HUANG Wen-sheng¹, WU Yi-feng³,
CAO Hai-bing¹, XU Yi-fei¹, GU Jing¹

(1. SINOPEC Petroleum Engineering Co. Ltd., Dongying 257000, China; 2. Shengli Oilfield Luming Oil & Gas Exploration and Development Co. Ltd., Dongying 257000, China; 3. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Focused on the characteristics of little domestic sewage, intermittent drainage, and significant water consumption fluctuation in oil and gas station, the sewage treatment process of constant water level anaerobic-anoxic/vertical pulse trickling filter/medium filter bed coupled with physicochemical biochemical ecological treatment is adopted to treat the station's sewage by alternating dry-wet operation. The sewage treatment capacity of the Luyuan management station of Dongying is $5.0\text{ m}^3/\text{d}$. The hydraulic retention time of constant water level anaerobic-anoxic is 1.2 days . The hydraulic load of a pulse trickling filter is $6.3\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ and that of the filter bed is $0.5\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$. After the start-up domestication and winter transition stage, the system ran stably. The average influent concentrations of COD, NH_4^+-N , TN and TP were 214.2 mg/L , 42.71 mg/L , 62.23 mg/L and 4.42 mg/L , respectively. The

average effluent concentrations of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN and TP were 31.9 mg/L, 4.29 mg/L, 10.74 mg/L and 0.53 mg/L, respectively, which meet the landscaping criteria in *The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Urban Miscellaneous Use* (GB/T 18920-2020) and first level A criteria in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). The average removal rates were 85.1%, 90.0%, 82.7% and 88.0%, respectively.

Key words: oil and gas station; domestic sewage; anaerobic-anoxic; pulse trickling filter; medium filter bed

长输管道油气站场是保障油气安全输送的重要环节,也是油气加压、分输(清管)和站场管理人员工作与生活的重要场所。长输管道站场一般距离城镇较远,生活污水无市政排水管网可依托,必须在站场内有效处理、尾水资源化利用。站场管理人员一般为10~50人,生活污水水量较少,排放比较集中。笔者调查了山东管网站场、西气东输赣湘管理处各站场、延长气田厂前区等24座污水处理设施,其中13座站场采用A/O-MBR工艺,11座为A/O工艺,处理达标后的污水用于站场绿化或外排。调查发现,以上污水处理工艺不能适应站场生活污水水量小、排水间隔大等特点,一体化污水处理设施运维难度大,而站场缺少专业管护人员,不能定期实施膜清洗与设备保养,一体化装备运行3年左右即出现设备腐蚀老化等现象,严重影响出水效果,出水水质很难稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。

针对偏远小型油气站场生活污水排放的特点,汲取国内常用污水处理工艺的优点^[1-3],通过工艺筛选优化,耦合物化、生化、生态三种工艺,形成恒水位厌氧-缺氧/竖向脉冲滴滤/多孔介质滤床的污水处理组合工艺处理油气站场生活污水,采用干湿交替运行,全流程仅在缺氧池内设置1台提升水泵,系统简约运行,管理简单方便,适用于偏远油气站场少人或无人值守的运行模式,可解决常规生化处理工艺不适应偏远小型油气站场生活污水间歇排放、出水很难稳定达标的难题。以东营市鲁源管理站生活污水处理工程应用为例,介绍了工艺流程、净化机理及处理效果,可为类似油气站场生活污水处理工程提供参考。

1 工程概况、净化机理及工艺设计

1.1 工程概况

该工程位于东营市鲁胜油公司鲁源管理站,处

理对象为站场洗涤和卫生间的生活污水,原水水质见表1。设计污水处理规模为5.0 m³/d,处理后的中水回用于管理站场区绿化浇洒,多余部分外排至站内雨水沟。处理出水水质需满足《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)的绿化用水标准和《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。

表1 原水与设计出水水质

Tab.1 Influent quality and design effluent quality

mg·L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TN	TP
原水水质范围	132~289	39~167	18.0~50.3	46.6~78.1	2.79~5.84
原水水质平均值	204	113.1	41.0	61.3	4.53
GB/T 18920—2020绿化用水标准限值	/	10	8	/	/
GB 18918—2002一级A排放标准	50	10	5(8)	15	0.5
设计出水水质	50	10	5(8)	15	0.5
注:“/”表示未规定指标限值;括号内数值为水温低于12℃时的控制指标。					

1.2 净化机理

该污水处理系统主要包括3个处理单元:厌氧-缺氧池、脉冲滴滤池(好氧)和生态介质滤床,各单元分别以不同的净化机理协同完成对有机物的去除,最终达到出水水质要求。

① 厌氧-缺氧池。本单元集厌氧池、缺氧池、泵池为一体,具有水质净化和水量调节作用,水力停留时间以1~2 d为宜。厌氧池保持恒水位运行,厌氧微生物与污水中的有机质充分接触,使得大部分有机污染物得到降解。厌氧池出水进入缺氧池,同时脉冲滴滤池好氧段的硝化液也回流至缺氧池。在缺氧条件下,反硝化细菌利用 NO_2^- 和 NO_3^- 作为电子受体,将硝酸盐还原成氮气,同时部分微生物利

用硝酸盐作为氮素营养,通过同化作用合成细胞物质,而缺氧池利用回流液的剩余溶解氧氧化污水中的还原性致臭物质,因此缺氧池具有异养反硝化同步脱氮除臭功能,总氮主要在缺氧池内去除,而对氨氮的削减主要靠回流稀释作用。随着回流比增大,缺氧池的溶解氧含量升高,破坏了缺氧环境,对反硝化脱氮起到抑制作用,对总氮的去除率会逐渐下降。硝化液回流比一般控制在200%~300%。

② 脉冲滴滤池。脉冲滴滤池作为好氧单元,内设多层复合生物填料,集有机物降解和生物脱氮除磷功能为一体。在自然充氧条件下持续进水,自动间歇排水,实现干湿交替运行,即当污水量较大时,均匀布水到多层填料,实现脉冲滴滤塔的湿式运行;当污水量间断时,多孔填料仍能保持一定的润湿度,填料多孔内微生物不会因缺水而“饿死”,以填料为载体继续在干式模式下实现对污染物的降解。因此,本装置具有较高的抗冲击负荷能力,在站场污水少甚至断水的条件下,仍能正常运行,解决了常规生化污水处理方式因水量少、C/N低等而无法达到预期处理效果的难题。本装置通过多层高效吸附填料对污染物进行截滤吸附,并经氨化、硝化、反硝化作用,将有机氮分解为氨氮,进一步转化为硝态氮,最后还原成氮气逸出;在各类微生物的共同作用下,实现脱氮,未被转化的硝态氮一部分回流至缺氧池进一步脱氮。

③ 生态介质滤床。主要通过填料物理截滤、吸附和钙磷沉淀去除氮、磷;微生物通过硝化和反硝化作用实现脱氮功能,吸收氨氮;生态介质滤床的水生植物通过吸收和同化作用将氮、磷转化为植物的蛋白质、ATP等,再通过植物收割而去除。

1.3 工艺设计

鲁源管理站卫生间的生活污水排至室外化粪池,经化粪池初步处理、格栅池截留大颗粒固体杂质后,进入厌氧-缺氧池(提升)—竖向脉冲滴滤池—多孔介质生态滤床—出水至清水池,工艺流程见图1。其中脉冲滴滤池部分出水至后端的多孔生态介质滤床,其余出水回流至缺氧池进一步脱氮除臭;清水池暂存处理后的中水,经消毒后用于绿化或外排。

① 厌氧-缺氧池。池体构型为《玻璃钢化粪池选用与埋设》(14SS706)中YJBH-3-Ⅱ改进型化粪池,有效容积为6.0 m³,前两格间采用上部溢流,

保持恒水位运行,容积为4.0 m³,填充 $\phi 150$ mm的弹性立体填料,填充率为80%。第三格为泵区,有效容积为2.0 m³,底部50%空间设置弹性填料,上部为水量调节区,泵池区内潜污泵将水提升至脉冲滴滤池顶部脉冲水箱。

② 竖向脉冲滴滤池。横截面平面尺寸为1.5 m \times 1.5 m,脉冲水力负荷为6.3 m³/(m²·d)。顶部脉冲水箱容积为40 L,设计脉冲时间为5~8 min,水箱内设落水胆,当水箱内水位达到高水位时,落水胆打开,水量脉冲至填料上部布水板,靠重力均匀布水至填料层,流经多层复合生物填料层至出水区。填料层高度为1.65 m,自下而上依次为5~10 mm粒径生物活性沸石层、2~3 mm粒径活性镁铝吸附填料、50~80 mm粒径轻质多孔缓释钙源除磷填料。为进一步强化脱氮效果,除磷填料中另增加硫铁矿。通过填料粒径配置,保持滤料层持水时间为10~20 min。脉冲水流在流经填料层过程中,依靠脉冲塔式构造拔风,同时实现跌水充氧。

③ 多孔生态介质滤床。填料总厚度为0.60 m,选择高吸附性能的生物填料和合理的级配,特别是轻质多孔靶向除磷填料,生成钙磷沉淀而固定下来,由植物吸收去除,大大提高截污吸附效果和去污能力,节省填料量,相对于传统的水平潜流湿地,填料层厚度减少50%以上。按照水流方向,依次纵向填充轻质多孔靶向除磷填料、活性沸石、火山岩等,顶部设置厚度为100 mm的细砂层作为植物定植层,种植适应北方寒冷地区多年生常绿鸢尾。滤床有效平面尺寸为5.0 m \times 2.0 m,表面水力负荷为0.50 m³/(m²·d)。

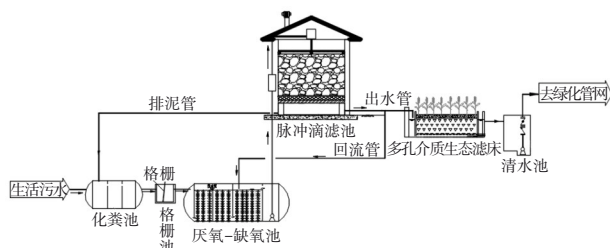


图1 污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of sewage treatment process

该工程于2021年10月建成并投入试运行,驯化完成后进入运行阶段。每周采样1次,设置进水、缺氧池出口、脉冲滴滤池出口、介质滤床出口等4个采样点,COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN、TP指标的分析方

法见《水和废水监测分析方法》(第4版)。

2 结果与分析

2.1 驯化与试运行阶段

鲁源管理站生活污水装置于2021年10月15日启动。接种污泥取自东营市基地南污水处理厂的二沉池,注入厌氧-缺氧池后,全回流方式连续运行2 d。按污水量为 $2.0 \text{ m}^3/\text{d}$ 试运行,每天连续运行5 h,回流比控制在300%左右;启动过程连续30 d,观察到厌氧-缺氧池内弹性填料上附着生物膜后,可作为驯化结束的标志。

自2021年11月15日进入试运行阶段,实际运行水量为 $2.0\sim 5.0 \text{ m}^3/\text{d}$,脉冲滴滤池回流比控制在200%~300%,外界环境温度为 $-2\sim 15^\circ\text{C}$ 。污水处理系统自动化运行,水泵根据池内设定的最高、最低水位控制自动运行,脉冲滴滤池与多孔介质滤床采用干湿交替运行模式。启动期分别于2021年11月26日与12月3日采集水样,水质数据见表2。

表2 试运行阶段水质变化

Tab.2 Variation of water quality during trial operation $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

采样时间/地点		COD	BOD ₅	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
2021-11-26	进水(原水)	230	70.0	45.70	65.1	4.64
	缺氧池出口	32	15.2	4.20	52.2	2.64
	脉冲滴滤池出口	25	5.2	1.07	50.3	0.64
	介质滤床出口	19	5.0	0.95	40.6	0.32
2021-12-03	进水(原水)	244	50.9	38.00	57.4	3.10
	缺氧池出口	84	8.4	10.62	46.5	1.46
	脉冲滴滤池出口	46	7.2	3.10	45.4	1.12
	介质滤床出口	23	6.0	2.10	42.2	0.25

系统试运行阶段,COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TP等指标均达到设计要求,而出水TN仍然高于 40 mg/L ,与 15 mg/L 的设计限值还有较大差距,分析原因是脉冲滴滤池回流比为200%~300%,回流污水携带溶解氧进入缺氧池,造成缺氧池内溶解氧 $>2.0 \text{ mg/L}$,在提升总氮去除率的同时,也抑制了反硝化反应强度,可适当降低回流比,保证缺氧环境。系统对TP的去除效果较好,主要是因为脉冲滴滤池和介质滤床靶向除磷填料高效的吸附截留作用;另外,基于水质变化,系统对TN以外的污染物均有较好的去除效果,分析原因是冬季室内使用热水比例较高,化粪池、厌氧池内的水温为 $14\sim 18^\circ\text{C}$,处理单元受环境温度影响较小,从而保证了污水处理系统的有效

运行。

2.2 稳定运行阶段水质变化

系统稳定运行阶段于2022年3月1日开始,每周采集一次水样,分析指标包括COD、NH₄⁺-N、TN、TP,共采集15次水样分析对污染物的去除率。

① COD去除效果(见图2)。稳定运行阶段系统进水(原水)COD为 $138\sim 289 \text{ mg/L}$,平均值为 214 mg/L ,滤床出水COD均低于 50 mg/L 的设计限值,平均出水COD为 31.9 mg/L ,平均COD总去除率为85.1%。从COD变化可以看出,厌氧-缺氧池是COD去除的主要单元,COD平均削减量为 138.6 mg/L ,对系统中COD的去除贡献率为76.0%。脉冲滴滤池和生态介质滤床对系统COD去除贡献率分别为15.9%和8.1%。从系统结构来看,厌氧-缺氧池/脉冲滴滤池/生态介质滤床协同发挥对有机物的去除作用,从而保证了出水水质达到设计要求。

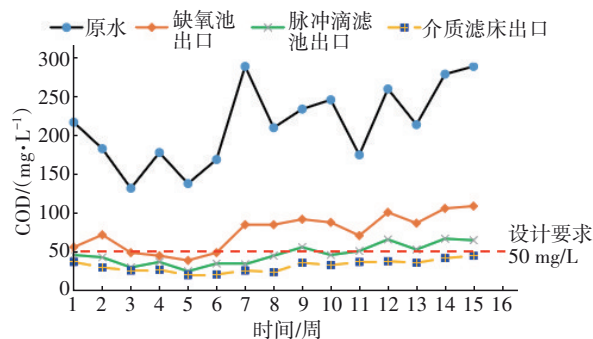
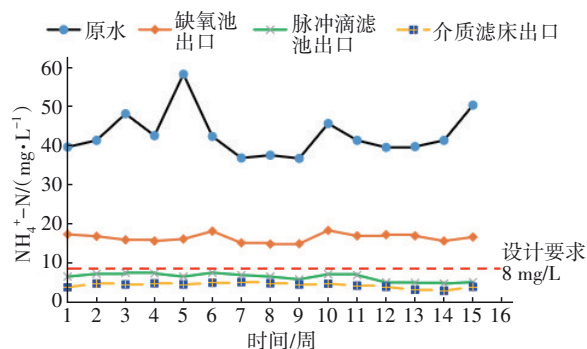


图2 COD浓度沿工艺流程变化

Fig.2 Change of COD concentration along the combined process

② NH₄⁺-N去除效果(见图3)。稳定运行阶段系统进水(原水)NH₄⁺-N为 $36.7\sim 58.2 \text{ mg/L}$,平均值为 42.7 mg/L ,与市政生活污水相比,NH₄⁺-N相对较高。滤床出水的NH₄⁺-N平均值为 4.29 mg/L ,所有周次的出水氨氮均低于 8.0 mg/L 的设计限值。系统流程中对NH₄⁺-N的平均总去除率为90.0%。从NH₄⁺-N变化可以看出,厌氧-缺氧池、脉冲滴滤池是去除氨氮的主要单元,厌氧-缺氧池对NH₄⁺-N的平均削减量为 26.3 mg/L ,脉冲滴滤池对NH₄⁺-N的削减量为 10.4 mg/L ,对系统中NH₄⁺-N去除的贡献率分别为61.6%和24.4%。脉冲滴滤池实现了对NH₄⁺-N的持续削减,保障了出水水质。从工艺流程NH₄⁺-N纵向浓度变化来看,脉冲滴滤池出水NH₄⁺-N已达到设计要求。

图3 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度沿工艺流程变化Fig.3 Change of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration along the combined process

③ TN 去除效果(见图4)。稳定运行阶段系统进水(原水)TN 为 51.3~78.1 mg/L, 平均值为 62.3 mg/L, TN 相对较高, 相对于市政污水来说, 站场内生活污水的 C/N 较低, 仅为 3.45。本工艺采用自养反硝化与生物膜的生化反硝化同步脱氮, 可提升 TN 去除效果。对总氮的去除主要由厌氧-缺氧池和脉冲滴滤池协同完成。介质滤床出水 TN 平均值为 10.74 mg/L, 且所有周次的出水 TN 均在 15.0 mg/L 设计限值附近, 而 TN 平均总去除率为 82.6%。从 TN 变化可以看出, 脉冲滴滤池出口的 TN 均已低于 15.0 mg/L 的设计要求, 而介质滤床对 TN 的去除贡献率仅为 8.5%。

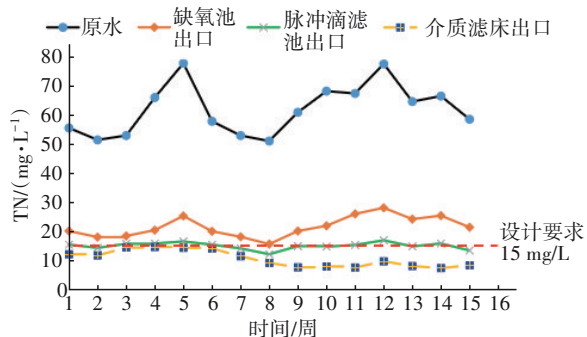


图4 TN 浓度沿工艺流程变化

Fig.4 Change of total nitrogen concentration along the combined process

常态化运行阶段进水 TN 较高, 厌氧-缺氧池反硝化的 TN 去除率大幅提升, TN 削减贡献率为 78.8%。脉冲滴滤池对 TN 的去除贡献率为 12.7%, 但该处理单元对 TN 的去除率达到 30.1%, 由于脉冲滴滤池采用轻质多孔除磷填料, 填料中增加硫铁矿, 20 min 的持水时间内单质硫和亚铁离子结合提供电子供体, 微生物完成自养反硝化功能^[4-6], 从而

强化了脱氮效果。

④ TP 去除效果(见图5)。稳定运行阶段, 系统进水(原水)TP 为 3.20~5.81 mg/L, 平均值为 4.42 mg/L, 滤床出水 TP 平均值为 0.53 mg/L, TP 平均去除率为 88%。从 TP 变化可以看出, 前4周进水 TP 偏高, 由于总排水量较少, 大量洗涤废水汇入, 导致 TP 偏高, 而此时生态介质滤床植物为换茬过渡期, 植物对磷的吸收受到影响, 出水 TP 保持在 1.0 mg/L 以下, 满足《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)的绿化用水标准, 可全部用于绿化, 不需要外排。随着用水量的增加, 进水 TP 有所下降, 生态介质滤床植物也随之生长, 充分发挥了吸收和同化作用, 第5周以后滤床出口的总磷浓度均满足设计要求。在常态化运行阶段, 厌氧-缺氧池、脉冲滴滤池和生态介质滤床对总磷的去除率分别为 45.7%、49.5% 和 56.6%, 可见以净水填料为主的脉冲滴滤池和生态滤床是除磷的主要功能区。

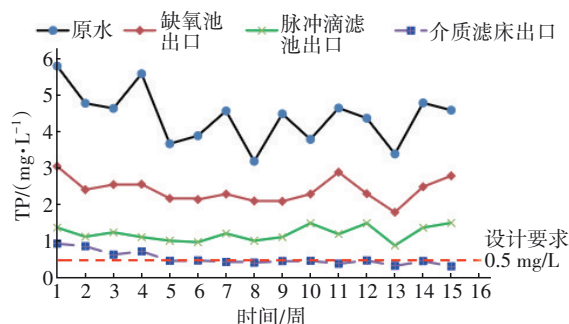


图5 TP 浓度沿工艺流程变化

Fig.5 Change of total phosphorus concentration along the combined process

3 技术经济分析

鲁源管理站生活污水设计处理水量为 5.0 m³/d, 总占地 31.05 m², 处理后水质满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准, 同步达到市政绿化用水的水质要求。

① 电费。全流程仅设 1 台 0.37 kW 潜水泵, 根据液位变化自动启停, 由于水量较小, 水泵出水部分回流以满足脉冲滤池的运行水量要求。运行 15 周, 污水处理设施周边 5 m 无异味, 累计处理污水量 231 m³、耗电 116.55 kW·h, 按工业电价为 0.65 元/(kW·h) 计算, 污水处理直接运行成本为 0.328 元/m³。根据工程经验, 常规 AO-MBR 工艺整机功

率约5.5 kW,每天运行5~10 h(按5 h计),耗电27.5 kW·h/d,污水处理直接运行成本为3.575元/m³。因此在相同处理规模条件下,该工艺运行成本比常规AO-MBR等生化工艺节省约90%。

② 运行管理。该系统动力设备仅1台潜水泵,不需要常规生化处理设备的定期加药清洗等复杂的专业管理,操作简单,维护管理方便,可有效节省人工管理成本。

综上,该工艺在直接运行成本和维护管理方面具有较大的优势,适于少人值守的油气站场生活污水处理。

4 结论

① 根据东营市鲁源管理站的生活污水水量、水质特点,采用恒水位厌氧-缺氧/竖向脉冲滴滤/多孔介质滤床的污水处理工艺,设计处理水量为5.0 m³/d,总占地面积为31.05 m²,运行成本为0.328元/m³。

② 驯化与试运行阶段,厌氧-缺氧池投加二沉池活性污泥,全回流连续运行2 d后,按2.0 m³/d试运行,回流比控制在300%,启动过程连续30 d,即成功驯化污水处理系统,但缺氧反硝化脱氮单元由于受温度影响,驯化周期相对较长。

③ 稳定运行阶段,系统根据原水的水量变化自适应干湿交替运行,出水COD、NH₄⁺-N、TN、TP的平均浓度分别为31.9、4.29、10.74和0.53 mg/L,满足《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)的绿化用水标准和《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。

综上,该生活污水处理工艺具有运行成本低、管理运维方便、适应性强、出水可稳定达标且节能环保,在长输管道偏远油气站场和乡镇企业污水处理领域具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 贾思重. 脉冲生物滤池工艺优化与装备开发研究[D]. 南京:东南大学,2015.
JIA Sizhong. Study on the Processing Optimization and Equipment Development of a Pulse Biological Filter [D]. Nanjing:Southeast University,2015(in Chinese).

- [2] 余浩,吕锡武,吴浩汀,等. 水解/脉冲滴滤池/人工湿地工艺处理农村生活污水[J]. 东南大学学报(自然科学版),2007(5):878-882.

YU Hao, LÜ Xiwu, WU Haoting, *et al.* Use of combined process of hydrolysis, pulse trickling filter and constructed wetland for rural sewage treatment [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007(5):878-882(in Chinese).

- [3] 韩霏,包心雨,曹本川,等. 基于不同电子供体反硝化脱氮技术研究进展[J]. 环境保护与循环经济,2022,42(7):27-32.

HAN Fei, BAO Xinyu, CAO Benchuan, *et al.* Progress on denitrification technology based on different electron donors [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2022,42(7):27-32(in Chinese).

- [4] 吕锡武. 可持续发展的农村生活污水生态组合治理技术[J]. 给水排水,2018,44(12):1-5.

LÜ Xiwu. Sustainable development of rural domestic sewage bio-ecological combined treatment technology [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018,44(12):1-5(in Chinese).

- [5] 冯琳. 潜流生态湿地中有机污染物降解中间产物分析方法及去除机理研究[D]. 成都:西南大学,2009.

FENG Lin. Study on the Analysis Method and Removal Mechanism of Organic Pollutant Degradation Intermediate in Subsurface Flow Ecological Wetland [D]. Chengdu: Southwest University, 2009 (in Chinese).

- [6] 余芃飞,刘田,叶宇兵,等. 多介质人工湿地提升再生水水质的工程实例[J]. 中国给水排水,2015,31(4):99-101.

YU Pengfei, LIU Tian, YE Yubing, *et al.* Upgrading technology project case of reclaimed water quality by multimedia constructed wetland [J]. China Water & Wastewater, 2015,31(4):99-101(in Chinese).

作者简介:阚和科(1972—),男,安徽砀山人,大学本科,高级工程师,主要从事消防给排水及污水处理等方面的工作。

E-mail:kanheke@163.com

收稿日期:2023-02-02

修回日期:2023-07-29

(编辑:衣春敏)