

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.14.019

反硝化除磷工艺处理农村生活污水的工程实践

高松¹, 何伟¹, 徐微¹, 王松凯¹, 秦玮²

(1. 安徽农业大学 资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 2. 中轻建设<安徽>设计工程有限公司, 安徽 合肥 230036)

摘要: 农村生活污水C/N低,限制了传统生物脱氮除磷工艺的处理效果,实际运行时往往需投加大量碳源,导致处理成本增加。反硝化除磷技术在处理低C/N生活污水方面具有突出的技术优势,但现有反硝化除磷工艺流程较为复杂,难以在农村地区应用。针对这一问题,联合SBR与生物接触氧化(BCO)工艺,设计了一种结构简单、自动化程度高、可调控性强的反硝化除磷工艺,并在常州某地开展了该工艺处理农村生活污水的工程实践。设置SBR厌氧段、缺氧段、好氧段反应时间分别为3、3、1 h,BCO的水力停留时间为4.6 h。实际运行结果表明,该工艺对COD、NH₄⁺-N、TN、TP的平均去除率分别为83.0%、92.5%、60.5%、85.1%,出水水质满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。

关键词: 农村生活污水; 脱氮除磷; SBR; 双污泥反硝化除磷; 生物接触氧化; 碳源利用

中图分类号: TU992 文献标识码: B 文章编号: 1000-4602(2023)14-0114-06

Demonstration for Application of Denitrifying Phosphorus Removal Process in Rural Domestic Sewage Treatment

GAO Song¹, HE Wei¹, XU Wei¹, WANG Song-kai¹, QIN Wei²

(1. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;
2. China Light Industry Construction <Anhui> Co. Ltd., Hefei 230036, China)

Abstract: The low-C/N ratio of rural domestic sewage limits the treatment effect of traditional biological nitrogen and phosphorus removal process. In actual operation, a large amount of carbon sources are often added, which leads to an increase in treatment cost. Denitrifying phosphorus removal technology has outstanding technical advantages in the treatment of low C/N domestic sewage, but the existing denitrification phosphorus removal processes are difficult to be applied in rural areas due to their complexity. To solve this problem, a denitrifying phosphorus removal process with simple structure, high degree of automation and good controllability was designed by combining SBR and biological contact oxidation (BCO), and applied in rural domestic sewage treatment engineering located in a village of Changzhou. The reaction time of anaerobic stage, anoxic stage and aeration stage of SBR was 3 h, 3 h and 1 h respectively, and the hydraulic retention time of BCO unit was 4.6 h. The operation results show that this process was effective on contaminants removals, with the average removal rates of COD, NH₄⁺-N, TN and TP being 83.0%, 92.5%, 60.5% and 85.1%, respectively. The water quality of the effluent met first

基金项目: 合肥市关键技术项目(2021CJ066)

通信作者: 徐微 E-mail: xuwei981@sina.com

level A criteria specified in the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002).

Key words: rural domestic sewage; nitrogen and phosphorus removal; SBR; double sludge denitrifying phosphorus removal; biological contact oxidation; utilization of carbon source

当前我国许多地区水体富营养化问题依然突出^[1],而农村生活污水是主要氮、磷污染源之一^[2],对于农村生活污水高效脱氮除磷技术的研究与应用仍显不足。在农村生活污水处理领域,生态处理技术备受推崇,但仍存在占地面积大等弊端,限制了其在土地资源相对紧张地区的应用。与生态处理技术相比,生物处理技术占地面积相对较小,但因农村生活污水C/N普遍较低,采用传统生物脱氮除磷工艺处理时,往往需要外加碳源,从而导致处理成本大幅增加。

反硝化除磷技术在缺氧段以 NO_3^- -N作为电子受体完成聚磷过程,实现了“一碳双用”,相对传统脱氮除磷工艺,最高可节省50%的碳源消耗、35%的曝气能耗^[3-4],在处理低C/N污水方面优势突出。但 A^2N 等现有反硝化除磷工艺流程较为复杂^[5],目前几乎未见该类工艺应用于农村生活污水处理的工程案例报道。

针对上述问题,联合SBR与生物接触氧化(BCO)工艺,开发了一种新型反硝化除磷工艺(SBR-BCO反硝化除磷工艺),在同一反应器内实现厌氧、缺氧、好氧的时间交替,无需污泥回流,结构简单,可实现全程自动控制。此外,该工艺整体上采用序批运行方式,能够根据实际水量、水质调整SBR运行周期及各阶段反应时间比,可在一定程度上应对农村生活污水水量波动较大的问题。以江苏省常州市新北区西夏墅镇某村的生活污水处理工程为例,介绍SBR-BCO反硝化除磷工艺对实际农村生活污水的处理效果。

1 设计水量和进、出水水质

该村建有完善的污水收集管网系统,采用雨污分流排水体制。所收集的生活污水包括冲厕污水及洗浴、餐厨污水等,设计处理规模为 $20\text{ m}^3/\text{d}$,根据前期水质调查结果,污水处理设施设计进水水质如表1所示。

设计出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	COD	TN	TP	NH_4^+-N
设计进水	150	35	2.4	30
设计出水	50	15	0.5	5(8)

2 工艺流程与设计参数

2.1 工艺流程

人工湿地等生态处理技术具有成本低、操作简单等优点,是农村生活污水处理的优选技术之一,但该村可供建设污水处理设施的土地面积有限,且出水水质要求较高,使得生态处理技术难以实施。相比较而言,生物处理工艺容积负荷高、占地面积小、温度适应性强,较适宜作为该村生活污水处理的主体工艺,但较低的C/N一直是困扰农村生活污水生物脱氮除磷的难题。考虑到反硝化除磷技术在处理低C/N污水方面的技术优势,项目建设单位决定将该村作为试点,开展SBR-BCO反硝化除磷工艺的工程示范,尝试通过该工艺的应用,提升碳源利用效率,在不投加碳源或化学除磷药剂的情况下使出水水质达到排放标准。

该村污水处理的整体工艺流程:污水经格栅进入调节池,再由潜污泵提升至SBR-BCO反硝化除磷系统,处理出水达标排放。

2.2 SBR-BCO反硝化除磷工艺原理

该工艺主要组成见图1,SBR、BCO为两个主要反应单元。SBR包括厌氧、缺氧、好氧(后曝气)3个反应阶段。厌氧阶段结束并通过沉淀进行泥水分离后,将厌氧上清液排至中间水池2,继而将存储于中间水池1的富磷硝化液提升至SBR,随后依次进行缺氧、好氧反应。中间水池1排水完毕,将中间水池2的厌氧上清液以一定流量连续提升进入BCO,BCO出水送入中间水池1存储,在下一周期缺氧反应阶段开始前送入SBR。好氧阶段结束后,再次沉淀,排出上清液(最终出水)。

SBR-BCO反硝化除磷系统的主要生化代谢机

理见图2。在SBR厌氧反应阶段,部分有机物经发酵转化为VFA,聚磷菌分解体内聚磷颗粒(Poly-P)产生能量(ATP),通过主动运输方式吸收VFA,联合体内糖原(Gly)合成聚羟基脂肪酸酯(PHA)^[6]。在缺氧、好氧反应阶段,聚磷菌分别以 NO_3^- -N、 O_2 为电子受体分解PHA生成糖原,并利用所产生的ATP吸收磷酸盐合成聚磷颗粒。缺氧阶段可同步实现硝酸盐的吸收和反硝化(反硝化聚磷),解决了生物除磷和脱氮之间的碳源竞争问题^[7]。

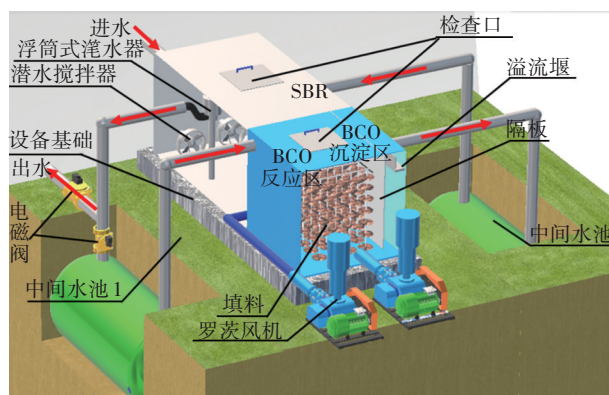


图1 SBR-BCO处理装备

Fig.1 Renderings for SBR-BCO treatment device

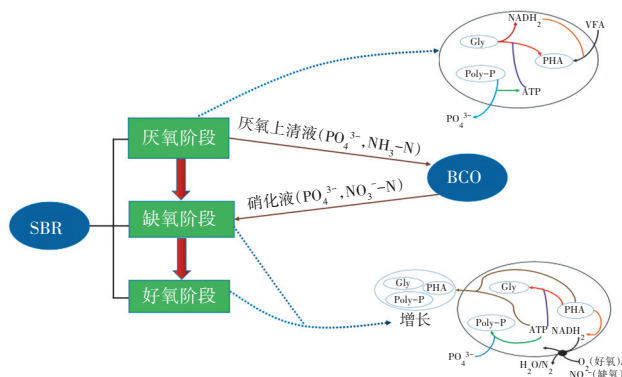


图2 SBR-BCO系统反硝化除磷机理

Fig.2 Denitrifying phosphorus removal metabolism in SBR-BCO systems

BCO单元通过好氧硝化作用将厌氧上清液中的 NH_4^+ -N转化为 NO_3^- -N,作为SBR缺氧反应阶段的电子受体。BCO单元填充组合填料作为生物膜载体,用以提升反应器内生物量,进而提高硝化反应速率;此外,厌氧阶段对碳源的大量消耗(通过厌氧释磷、普通反硝化等作用),大幅降低了进入BCO单元的有机物浓度,从而减小了异养菌对溶解氧的竞争,可为硝化反应创造有利条件。

本工艺中SBR与BCO的污泥系统相互独立,两

单元仅通过中间水池交换上清液,属典型的双污泥系统,解决了聚磷菌与硝化菌之间的污泥龄矛盾。同时,本工艺充分利用序批式反应器的优势,在SBR单元实现了厌氧/缺氧/好氧的时间交替,节省了多个处理构筑物,且各阶段反应时间可独立设置,增大了参数调控空间。SBR与BCO两个单元均无需污泥回流,在一定程度上减少了工艺操作的复杂性,并有利于节约能耗。

2.3 主要构筑物及设计参数

① 调节池

设置1座埋地式调节池,钢筋混凝土结构,设计停留时间为1 d,有效容积为 20 m^3 ,调节池内配置无堵塞潜污泵2台(1用1备),设计流量为 $20 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程为 105 kPa 。

② SBR-BCO一体化处理设备

SBR与BCO单元采用一体化设计,设备主体为碳钢材质,地上式安装,基础为钢筋混凝土结构,尺寸为 $2.5 \text{ m} \times 1.9 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$,承重 25 t 。

SBR的设计参数主要依据设计水量、水质以及预试验结果确定。每天运行2周期,每周期12 h,包括进水1 h(进原水及硝化液各 0.5 h)、厌氧3 h、缺氧3 h、好氧1 h、沉淀3 h(厌氧、好氧阶段结束后各沉淀 1.5 h)、排水1 h(排厌氧上清液及最终出水各 0.5 h),污泥浓度维持在 $2000 \sim 2500 \text{ mg/L}$,污泥龄 $10 \sim 15 \text{ d}$ 。SBR单元尺寸为 $3.6 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$,超高 0.3 m 。底部铺设215型微孔曝气器35个,设计气水比为 $3:1$ 。设备:风机2台(1用1备,风量 $0.33 \text{ m}^3/\text{min}$,风压 30 kPa);潜水搅拌机3台(2用1备,功率为 0.37 kW ,2台搅拌机安装于反应器底部,交替运行);浮筒式滗水器1台,流量为 $20 \text{ m}^3/\text{h}$,最大滗水深度 1.8 m 。

BCO单元总尺寸为 $1.5 \text{ m} \times 1.55 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$,超高 0.3 m ,设计水力停留时间为 4.6 h ,进水流量采用阀门联合浮子型液体流量计调控。在BCO单元出水端以隔板分隔出沉淀区域,尺寸为 $1.2 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 。反应区内部悬挂 $\text{Ø}150 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 组合填料,底部铺设215型微孔曝气器9个,配置风机2台(1用1备,风量 $0.15 \text{ m}^3/\text{min}$,风压 30 kPa)。BCO单元的气水比同样为 $3:1$ 。由于BCO单元设计风量较小,采用间歇曝气方式运行。

③ 中间水池

2座中间水池位于SBR-BCO一体化处理设备

两侧,为埋地式玻璃钢罐体,长3.8 m,罐体的横截面为圆形,半径1 m。中间水池1配套潜污泵2台(1用1备,流量20 m³/h,扬程105 kPa);中间水池2配套潜污泵2台(1用1备,最大流量1 m³/h,扬程100 kPa)。

④ 自动控制

采用PLC控制柜配合连杆浮球液位控制器、电磁阀(DF80)、时间继电器等控制部件实现全程自动控制,所有运行参数可通过触屏手动调节。PLC控制柜置于设备间,设备间尺寸为4 m×2.5 m×2.5 m,彩钢结构,内部同时安装风机等设备。

3 运行效果及技术经济分析

该工程于2018年12月底建成运行,SBR进、出水容积交换率为0.725,实际处理水量为17.2 m³/d,与设计处理水量较为接近。

接种污泥取自常州市新北区某A²/O工艺污水处理厂。整个处理系统运行15 d后达到相对稳定的处理效果,之后每隔3~5 d采集一次水样,连续3个月监测各主要反应阶段(单元)COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TN、TP浓度。水温为11~16℃。尽管运行期间温度较低,但因接种污泥已经历过较长时间的低温驯化,处理过程中依然表现出较好的生化代谢性能。

3.1 主要污染物去除效果

主要污染物去除效果见图3。运行期间,进水COD、NH₄⁺-N、TN、TP浓度分别为121.8~209.0、21.0~37.7、23.5~40.1、1.77~3.47 mg/L,出水COD、NH₄⁺-N、TN、TP分别降至21.4~29.9、0.1~1.86、7.4~14.9、0.12~0.49 mg/L,以上污染物的平均去除率分别为83.0%、92.5%、60.5%、85.1%,出水水质满足一级A标准。

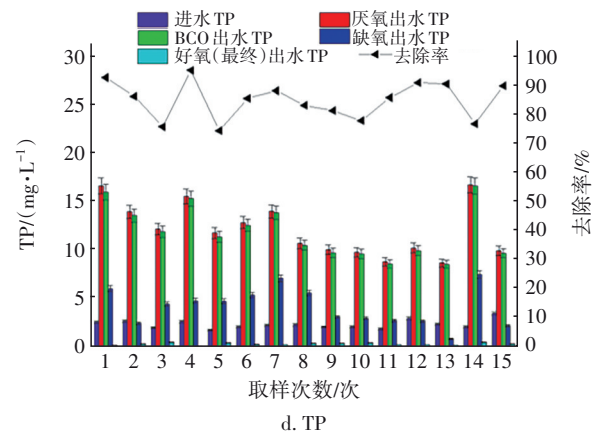
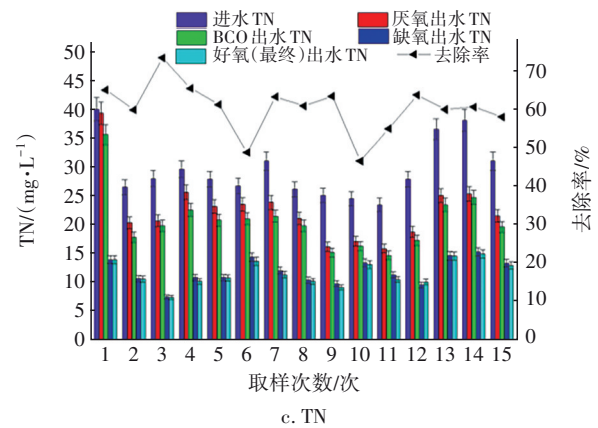
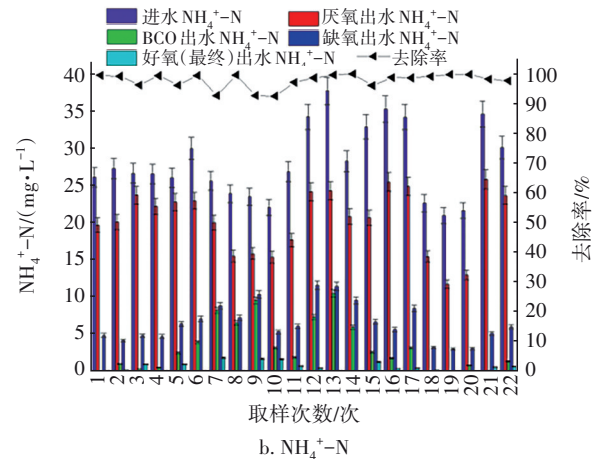
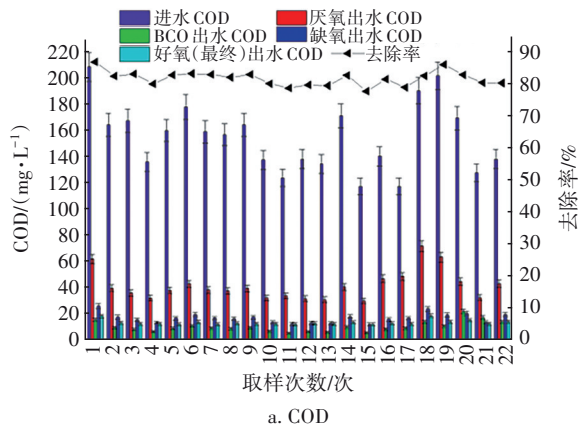


图3 各污染物沿程变化

Fig.3 Variety of each contaminant along the process

通过物料衡算得出各污染物的平均去除贡献率分布(见图4)。厌氧阶段耗氧过程消耗的有机物量根据该阶段溶解氧的去除量计算;以外加碳源为电子供体的普通反硝化过程所消耗的COD量,按NO₃⁻-N去除量的2.86倍估算。

聚磷菌在厌氧反应阶段充分吸收污水中有机物并转化为PHA存储(厌氧释磷),是反硝化聚磷过程发生的一个基本前提。该工程设置了较长的厌

氧反应时间,使被去除的有机物大部分消耗于SBR的厌氧反应阶段,该阶段对COD去除的平均贡献率达到了74.3%。厌氧阶段溶解氧对有机物的消耗量极小,普通反硝化是与反硝化聚磷过程竞争碳源的主要反应过程。进、排水时采用了较高的容积交换率(0.725)以减少上一周期残留的硝酸盐量,使厌氧段普通反硝化过程所消耗的碳源仅占该阶段碳源消耗总量的14.2%。厌氧阶段81.7%的碳源消耗应发生在污泥厌氧释磷等其他过程,除去发酵过程产生的少量有机物损失以及异养菌缺氧生长同化的部分碳源,其余应主要用于聚磷菌胞内PHA的合成。

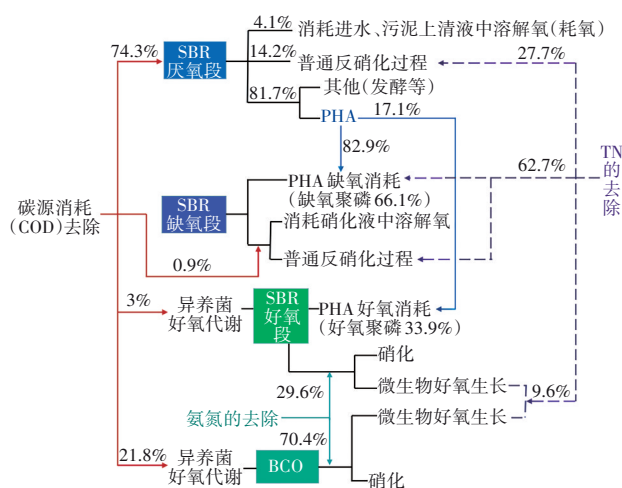


图4 主要污染物去除贡献分布

Fig.4 Distribution of the contributions for contaminants removals

在所设计的SBR-BCO反硝化除磷系统中,缺氧段反硝化聚磷的 NO_3^--N 电子受体主要来自BCO出水。在排出厌氧上清液时,较高的容积交换率使大部分 NH_4^+-N 在BCO单元被去除,BCO单元对 NH_4^+-N 去除的贡献率为70.4%,被去除的 NH_4^+-N 除少部分用于微生物生长外,多数应转化为 NO_3^--N 。

该工艺将SBR的缺氧段设在好氧段之前,并设置足够长的缺氧反应时间,令厌氧阶段合成的PHA优先用于反硝化聚磷过程。SBR厌氧段合成的PHA大部分(约82.9%)在缺氧段被消耗,同步实现了较好的缺氧聚磷及脱氮效果,该阶段的聚磷量占总聚磷量的66.1%,对TN去除的贡献率达到了62.7%。SBR缺氧段仅消耗了极少量的有机物(见图4),表明该阶段的普通反硝化作用可以忽略,TN

的去除应主要来自以PHA为电子供体的反硝化聚磷过程(包括同步发生的异养菌的缺氧生长)。

以上分析表明,该工程所采用的工艺通过强化反硝化聚磷过程,优化了碳源的分配利用,是实现较好污染物去除效果的一个重要因素。需要说明的是,SBR最后的好氧阶段对整个系统的污染物去除效果起到了保障作用。该阶段可去除未排出BCO单元的厌氧上清液中残留的 NH_4^+-N ;同时,由于缺氧聚磷量受限于 NO_3^--N 电子供体数量,SBR好氧段可继续以氧为电子受体聚磷,使TP进一步降低^[8]。

3.2 技术经济分析

农村生活污水处理设施运行成本包括电费、药剂费、人工费等。其中电费、药剂费与处理工艺直接相关。实际运行过程中的设备耗电量如表2所示,各用电设备的运行时间由工艺运行方式及运行参数决定。该工程电耗为15.9 kW·h/d,实际处理水量为17.2 m³/d,则耗电量为0.93 kW·h/m³。电价按0.67元/(kW·h)计,折算电费为0.62元/m³。进入BCO单元厌氧上清液中的有机物浓度相对于原水有机物浓度显著降低,需氧量相应减小;SBR缺氧段对污泥体内PHA的大量消耗亦降低了好氧段的溶解氧需求。因此,BCO、SBR好氧段均采用了较低的气水比(3:1),可在一定程度上节约运行能耗。

表2 设备耗电量

Tab.2 Power consumption of the devices

项目	功率/ kW	数量/ 台	设计运 行时间/ (h·d ⁻¹)	实际运 行时间/ (h·d ⁻¹)	耗电量/ (kW·h· d ⁻¹)
调节池提升泵	1.10	1	1	0.86	0.95
SBR潜水搅拌机	0.37	1	12	12.00	4.44
SBR曝气风机	0.55	1	2	2.00	1.10
BCO曝气风机	0.25	1	7	6.00	1.50
中间水池1潜污泵	1.10	1	1	0.86	0.95
中间水池2潜污泵	0.37	1	22	18.92	7.00

运行期间未投加任何药剂,不产生药剂成本。需要说明的是,是否投加药剂与具体的进水水质有关,尽管反硝化除磷工艺可在一定程度上实现碳源的优化利用,但当原水C/N过低,或者进水磷酸盐浓度过高时,仍可能需要外加药剂辅助提升处理效果。

人工费与工程所在地的经济水平、人力资源以

及污水处理设施运营模式有关,因此未对该部分进行计算。该工艺实现了全流程自动控制,操作管理方便,人力需求应不高于现有的其他生物脱氮除磷工艺。

4 结论与展望

① 联合SBR与接触氧化(BCO)开发了一种新型反硝化除磷工艺,结合在江苏省常州市新北区西夏墅镇某村的生活污水处理工程实例,分析了污染物去除过程与效能。运行结果表明,该工艺通过强化反硝化聚磷过程优化了碳源的分配利用,获得了较好的处理效果,对COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP的平均去除率分别为83.0%、92.5%、60.5%、85.1%,出水水质满足一级A标准。

② 运行期间生活污水平均C/N>4,未投加任何化学药剂;电耗为 $0.93\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,电价按 $0.67\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计,折算电费为 $0.62\text{ 元}/\text{m}^3$ 。整个工艺实现了全流程自动控制,操作管理方便。

③ 工艺整体上为序批式运行,理论上在应对水量波动上更具优势,但实际运行期间水量相对稳定,今后仍需在运行工况下进行更多验证。此外,工艺整体上包含多个相互关联的反应过程,今后可构建工艺数学模型,辅助工艺的设计和运行调控。

参考文献:

- [1] 张择瑞,李卫华,胡淑恒,等. 不同植物净化富营养化水体的效果和群落分析[J]. 中国给水排水,2021,37(7):78-84.
ZHANG Zerui, LI Weihua, HU Shuheng, *et al.* Effect of different plants on purification of eutrophic water bodies and community analysis [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(7): 78-84 (in Chinese).
- [2] 陈江杰,贺雷蕾,刘锐,等. A^2O 设施处理长三角平原地区农村生活污水的效果[J]. 中国给水排水,2020,36(9):75-82.
CHEN Jiangjie, HE Leilei, LIU Rui, *et al.* Performance of A^2O facilities for rural domestic sewage treatment in Yangtze River Delta plain [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(9): 75-82 (in Chinese).
- [3] SUN Y W, PENG Y Z, ZHANG J H, *et al.* Effect of endogenous metabolisms on survival and activities of denitrifying phosphorus removal sludge under various starvation conditions [J]. Bioresource Technology, 2020, 315: 123839.
- [4] 吴春英,白鹭. 新型短程硝化同步反硝化除磷工艺的运行调控[J]. 中国给水排水,2019,35(11):108-112.
WU Chunying, BAI Lu. Operation and regulation of a novel shortcut nitrification coupled with simultaneous denitrifying phosphorus removal process [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (11): 108-112 (in Chinese).
- [5] 韦佳敏,刘文如,程洁红,等. 反硝化除磷的影响因素及聚磷菌与聚糖菌耦合新工艺的研究进展[J]. 化工进展,2020,39(11):4608-4618.
WEI Jiamin, LIU Wenru, CHENG Jiehong, *et al.* Influencing factors of denitrifying phosphorus removal and advance research on novel process of coupling PAOs and GAOs [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(11): 4608-4618 (in Chinese).
- [6] 范亚骏,张淼,季俊杰,等. A^2O -BCO系统中碳源类型对反硝化除磷及菌群结构的影响[J]. 中国环境科学,2022,42(1):172-182.
FAN Yajun, ZHANG Miao, JI Junjie, *et al.* Effect of carbon source types on denitrifying phosphorus removal and microbial community in the A^2O -BCO process [J]. China Environmental Science, 2022, 42(1): 172-182 (in Chinese).
- [7] 李伟光,李东辉,姚杰,等. 污泥龄对BBSNP工艺反硝化除磷脱氮效能的影响[J]. 中国给水排水,2020,36(17):13-17.
LI Weiguang, LI Donghui, YAO Jie, *et al.* Effect of sludge retention time on nitrogen and phosphorus removal efficiency of bi-bio-selector for nitrogen and phosphorus removal process [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(17): 13-17 (in Chinese).
- [8] ZHANG M, GAO J, FAN Y J, *et al.* Combined effects of volume ratio and nitrate recycling ratio on nutrient removal, sludge characteristic and microbial evolution for DPR optimization [J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 104(6): 69-83.

作者简介:高松(1997-),男,安徽宣城人,硕士研究生在读,主要研究方向为水污染控制。

E-mail: xuwei981@sina.com

收稿日期:2022-02-25

修回日期:2022-03-29

(编辑:衣春敏)