污水处理与回用

程晓夏, 黄剑, 郑力, 等. 自然循环炭系载体系统用于城镇生活污水处理的试验[J]. 净水技术, 2022, 41(11):62-69.
CHENG X X, HUANG J, ZHENG L, et al. Experiment of natural circulation carbon-based system in urban domestic wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(11):62-69.

扫我试试?

自然循环炭系载体系统用于城镇生活污水处理的试验

程晓夏,黄　剑,郑　力,邹　刚,刘　菲
(湖北省自动化研究所股份有限公司,湖北武汉　430072)

摘　要　自然循环炭系载体(NCC)系统由自然循环系统技术发展而来,以生物酶木炭为载体,对生活污水中的 COD_{Cr}、氨氮和 TP 有良好的处理效果。文章使用 NCC 系统对某城镇生活污水进行处理,持续 1 年监测进出水水质,并对系统中循环式活性污泥法(CASS)单元和 NCC 单元的独立处理效果和贡献进行分析。结果表明,经处理后进入河道的生活污水,其 COD_{Cr}、氨氮和 TP 的平均去除率分别达到 86.33%、99.00%和 97.30%,出水水质指标稳定达到且远远高于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 排放标准。组合工艺中,CASS 贡献约 70.00%的平均削减量,NCC 系统对氨氮和 TP 的独立处理效果达 95.00%以上,COD_{Cr} 和 TN 的去除率也可达到 60.00%~76.00%,将 CASS 出水标准提升至地表“准Ⅳ类”(除 TN 外,其他指标满足Ⅳ类标准),适用于生活污水的深度处理。

关键词　自然循环炭系载体(NCC)系统　生活污水　填料　深度处理　生物酶木炭　循环式活性污泥法(CASS)
中图分类号:TU992　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1009-0177(2022)11-0062-08
DOI:10.15890/j.cnki.jsjs.2022.11.009

Experiment of Natural Circulation Carbon-Based System in Urban Domestic Wastewater Treatment

CHENG Xiaoxia, HUANG Jian, ZHENG Li, ZOU Gang, LIU Fei
(*Hubei Automation Research Institute Co., Ltd., Wuhan　430072, China*)

Abstract　The natural recirculation carbon-based (NCC) system is developed from the natural recirculation system technology, using bioenzyme charcoal as a carrier, and has good treatment effects on COD_{Cr}, ammonia nitrogen and TP in domestic wastewater. In this study, the NCC system was used to treat domestic wastewater in a town, and the influent and effluent quality were monitored for one year, and the independent treatment effects and contributions of cyclic activated sludge system (CASS) and NCC units in the system were analyzed. The results showed that the removal rates of COD_{Cr}, ammonia nitrogen and TP of domestic wastewater entering the river reached 86.33%, 99.00% and 97.30%, respectively, and the effluent quality indices steadily reached and were much higher than the first class A criteria of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918—2002). In the combined process, CASS contributed about 70.00% of the average reduction, the independent treatment effect of NCC system on ammonia nitrogen and TP reached more than 95.00%, and COD_{Cr} and TN also could reach 60.00%~76.00%, which improved the CASS effluent quality to the “ground standard Ⅳ” (other indices can meet Ⅳ grade standard except TN), and it is suitable for the deep treatment of domestic wastewater.

Keywords　natural recirculation carbon-based (NCC) system　domestic wastewater　packing　advanced treatment　bioenzyme charcoal　cyclic activated sludge system (CASS)

[收稿日期]　2021-06-09
[基金项目]　湖北省科技发展专项:自然循环碳系载体技术在黑臭水体治理工程中的应用(KJFZ2019007)
[作者简介]　程晓夏(1988—　),女,工程师,主要从事水处理相关技术及设备研发,E-mail:chengxiaoxiaojy@163.com。

自然净化是污水处理技术的一种,主要借鉴污水在自然环境下的自净循环过程,利用土壤、植物以及天然材料等载体对污水进行处理[1-3]。其中,自然循环(natural circulation,NC)系统即一类基于天然材料的污水自然净化系统,在20世纪90年代由日本Matsumoto教授等[4]首先提出。该技术采用朽木、木炭、贝壳乃至石块等天然材料作为滤材,利用天然材料的生物亲和性和高孔隙度,促进功能微生物在材料表面的生长,对污水中的有机物、氮、磷等主要污染物进行处理,达到较好的处理效果[5]。基于该技术的Shimanto-gawa系统作为一种低成本、高效、环境友好的污水处理模式,在日本及多个国家成功推广,成为河道及流域处理的有效技术手段之一[6-9]。

但污染水体种类繁多,需要处理的污染物也千差万别,以纯天然炭(如朽木、木炭)为载体的NC污水处理技术的处理能力相对局限,一定程度上限制了NC系统的应用前景。为此,江鹰等[10]在NC系统的基础上进行改进,使用生物酶木炭等材料作为载体,形成自然循环炭系载体(natural circulation carbon-based,NCC)系统,在保持原技术优势的同时增加系统的处理能力,使其可以更广泛地应用于各类污水处理场合。

随着城市化的进程,越来越多的城镇纳入城市体系,但与之配套的生活污水处理系统并未完全跟上,导致部分生活污水未经处理便排入天然水体,或者因合流制溢流形成污染,严重威胁周边水体环境,甚至形成黑臭水体[11-13]。对城镇生活污水的实证研究[14-15]发现,我国生活污水主要为有机污染,而且其污染呈现季节波动大的特点,对AO等城镇污水处理厂使用的常见工艺造成一定冲击,处理效果不佳。NCC系统由于良好的稳定性,对污水水量、水质的冲击耐受更好。但NCC系统更适宜深度处理,研究[16]表明,炭系填料在进水水质较差时(COD_{Cr}>500 mg/L),处理效果会受到一定影响。因此,本研究采用连续进水周期循环曝气活性污泥(CASS)工艺与NCC工艺作为组合,对某城区合流制的城镇生活污水进行处理,通过对运行期间进出水水质的检测和分析,为NCC工艺在城镇生活污水治理中的应用提供实践参考。

1 项目概况

1.1 项目背景

本研究处理的生活污水主要来自周围开发区生活区域,该区域原为城郊,未进行雨污分流改造,周边雨水管和污水管错接、混接,导致形成合流制溢流污染。该区域虽已建有污水处理厂,但生活污水的排放量大大超过了该区域污水处理厂的消纳能力。因此,实际运行中,该区域大部分生活污水直接流入河道,长期积累导致淤积,进而发酵发臭,成为黑臭水体。

本研究的主要目标是对排入该河段的生活污水进行处理,待处理完成符合排放水质要求之后再流入河道,以达到削减污染物、治理黑臭水体的目的。根据相关政策要求,排入该河道的排水水质应达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A排放标准。

1.2 设计规模和进水水质

根据所在泵站的历年水量统计数据,并综合考虑远期的排水量,确定系统处理规模为8 000 m^3/d。根据前期监测数据,进水水质随季节波动较大。处理目标则根据运营期内要求出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A排放标准进行设计,具体设计进出水水质如表1所示。

表1 系统设计进出水水质

Tab. 1 Designed Quality of Influent and Effluent

水质指标	pH值	COD_{Cr}/($mg\cdot L^{-1}$)	SS/($mg\cdot L^{-1}$)	氨氮/($mg\cdot L^{-1}$)	TN/($mg\cdot L^{-1}$)	TP/($mg\cdot L^{-1}$)
进水水质	6~9	50~500	150~300	25~50	30~50	10~15
出水水质	6~9	50	10	5	15	0.5

2 工艺方案

2.1 技术选择

由于城镇生活污水水质和水量的变化都较大,其COD_{Cr}质量浓度最高可达500 mg/L,超出NCC系统的适宜处理范围。考虑到NCC系统的技术特点,最终工艺设计选择CASS系统作为前置处理技

术,将 NCC 系统作为深度处理,在保证出水水质的前提下,提高工艺的效率和稳定性。此外,配套沉砂池、污泥池和消毒池,分别实现 SS 沉淀、污泥收集及干化和紫外线消毒等功能,保持系统功能完整。

同时,考虑到该污水处理站的建设地点位于已建成的城市区域,故将整个厂区和设备设计为地埋式结构,地面建设为体育运动场和城中心娱乐公园,其外观与周围的街道绿地、小区建筑大楼环境相互融合,满足工艺和实际需求。

2.2　工艺流程

根据进出水水质要求和工艺需求分析,设计工艺流程如图 1 所示。

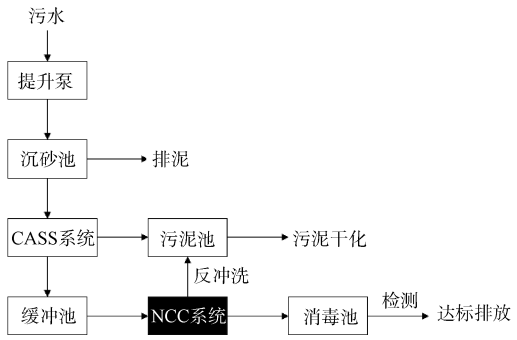

图 1　工艺流程

Fig. 1　Process Flow

污水进入系统后,首先经过沉砂池,去除大部分悬浮颗粒物,随后进入 CASS 系统。在 CASS 系统中,通过活性污泥的作用,污水中的污染物得到初步处理,较大部分的有机物、氨氮、TP 和 TN 被去除,然后流入 NCC 系统进行深度处理。CASS 系统和 NCC 系统之间通过调节缓冲池相连,调节缓冲池用于维持 NCC 系统的进水稳定性。经 NCC 系统处理后,再通过渠道式紫外线消毒器进行消毒,去除其中的有害微生物。出水经检测达标之后排入河道。CASS 系统和 NCC 系统运行过程中产生的污泥定期清理,干化后运出。

2.3　NCC 系统简介

2.3.1　NCC 工艺流程

NCC 系统为本工艺的核心系统。污水经过初步沉淀和 CASS 系统的初步处理之后,进入 NCC 系统进行深度处理。NCC 系统组成如图 2 所示,由快滤池、好氧消化池和除磷池 3 个部分组成。

其中,快滤池用于截留进水中携带的主要 SS,包括来自 CASS 系统的部分污泥;好氧消化池对污水中的 BOD_5、COD_{Cr}、氨氮等污染物进行生物氧化处理,主要填充普通炭系填料(生物酶木炭),配合填充部分钙系填料补充功能,并在消化池底部布

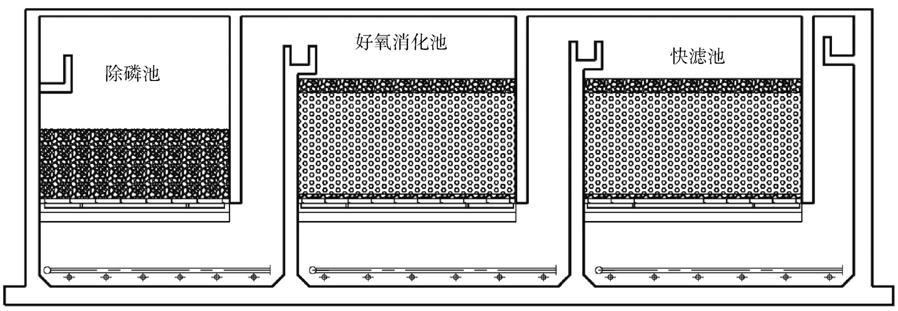

图 2　NCC 系统的组成

Fig. 2　Composition of NCC System

设曝气管道供氧;除磷池位于系统末端,池中填装除磷炭系填料(生物酶木炭),池底曝气,对污水的 TP 进行物理性吸附和生物性吸收。3 个处理单元之间水流通过自流方式沿着导流管流动,水流方向和气流方向一致。

由于 NCC 技术所产生的污泥极少,不另外设计污泥池,只在系统进行反冲洗时将产生的微量污泥与反冲洗水一起排出。

2.3.2　核心填料

NCC 系统采用的核心填料为生物酶木炭。生物酶木炭是将天然木质材料低温炭化,并利用改性手段,在木炭表面增加相关功能微生物(如磷聚合菌、硝化细菌等)以及其他相关功能组分(如金属)等。根据组成和功能不同,NCC 系统使用的生物酶木炭包括 2 类:普通炭系填料和除磷炭系填料。

普通炭系填料的填料比表面积达 100 ~ 300

m^2/g,为微生物的生长繁殖提供了大量场所,有利于生物膜的形成。另外由于改性,增加了填料的微生物亲和性,使微生物在填料表面和内部大量繁殖(图3),形成“极爆效应”,填料微生物量高达 $1.2\times10^{10}\sim5.6\times10^{10}$ 个/g,从而达到对污水中 COD_{Cr}、BOD_5、阴离子表面活性剂(LAS)、氨氮等污染物质高效稳定地去除。

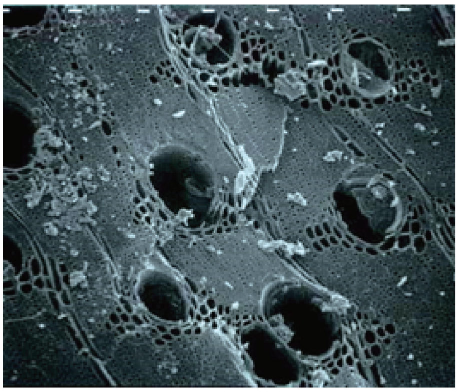

图3 生物酶木炭(普通炭系填料)表面[17]
Fig. 3 Surface of Bioenzyme Charcoal (Normal Carbon-Based Packing)[17]

除磷炭系填料是在普通炭系填料的组成中添加腐殖质泥炭、金属等组分,并在表面进行磷聚合菌的固定和包埋。其使用须和普通炭系填料配合,通过普通炭系填料熟化形成的生物酸,使聚合除磷填料内部的金属离子产生可控性溶解,待处理水流经聚合除磷填料时,水体中的微量磷酸盐和聚合除磷填料内部的金属离子产生化学反应,而待处理水体中的磷酸盐附着在填料表面,从而达到持续除磷的效果。聚合除磷填料定期进行反冲洗,反冲洗的含磷泥水混合物进入污泥系统,聚合除磷填料则恢复除磷能力。其显微结构如图4所示(40倍)。

图4 除磷炭系填料(40倍)
Fig. 4 Phosphorus Removal Carbon-Based Packing (40 Times)

针对本项目,设计 NCC 系统的水力停留时间为 4 h,生物酶木炭填料量为 250 m^3,填料上下采用不锈钢承托滤板拦截,防止填料流失。BOD_5 容积负荷为 $0.6\sim2.5$ kg/($m^3\cdot d$),可以应对水质变化的冲击影响。生物酶木炭区连续曝气,曝气方式采用穿孔曝气管,各单元定期反冲洗、排泥。

2.4 分析项目和方法

为测试 NCC 系统的运行效果,在系统稳定运行后,采用在线水质监测系统定期监测 NCC 系统进出水的 COD_{Cr}、氨氮,并定期取样检测进出水的 TP。此外,在系统正常运行1年后(2020年3月),对系统各单元的出水水质进行检测(COD_{Cr}、氨氮、TN、TP),以评估 CASS 单元和 NCC 单元在污水处理中的贡献。

其中,COD_{Cr} 及氨氮均采取连续流动注射比色法进行自动监测,其余水质指标则参考《水和废水检测分析方法》[18]进行检测。

3 运行状况及处理效果

该污水处理设施建成后,经过试运行和调试,于2019年3月开始正式运行。通过对2019年3月—2020年1月的污水处理系统进出水水质数据进行检测和分析,发现出水水质均优于设计目标,对各污染物的去除效果良好,具体如下。

3.1 COD_{Cr} 的去除效果

2019年3月—2020年1月,进出水 COD_{Cr} 及系统对 COD_{Cr} 的去除率如图5所示。进水 COD_{Cr} 质量浓度在 $24.05\sim396.00$ mg/L,均值为 156.12 mg/L。监测期间,系统进水 COD_{Cr} 变化波动相对较大,最高达 396.00 mg/L。经过“CASS 系统+NCC 系统”组合工艺处理后,系统出水 COD_{Cr} 基本稳定,运行前期(2019年3月—6月)出水 COD_{Cr} 质量浓度在 $14.09\sim49.52$ mg/L,运行后期(2019年7月—2020年1月)出水 COD_{Cr} 质量浓度在 $3.00\sim12.32$ mg/L,均满足设计目标。

整个监测期间,COD_{Cr} 去除率在 $41.41\%\sim99.01\%$,均值为 86.33%。运行前期(2019年3月—6月)COD_{Cr} 去除率波动幅度相对较大,运行后期(2019年7月—2020年1月)COD_{Cr} 去除率稳定在 95.00%左右。

3.2 氨氮的去除效果

2019年3月—2020年1月,进出水氨氮浓度及

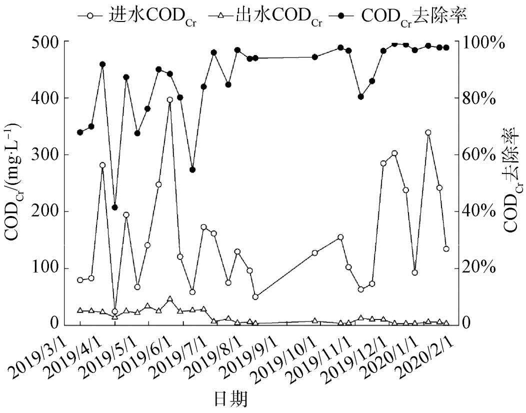

图 5　净化设施进出水 COD_{Cr} 变化

Fig. 5　Changes of COD_{Cr} in Influent and Effluent of Purification Facilities

系统对氨氮的去除率如图 6 所示。整个监测期间,系统进水的平均氨氮质量浓度为 42.70 mg/L,其中,2019 年 11 月 26 日—12 月 16 日进水氨氮浓度异常,分别达到了 97.50、125.30、119.50 mg/L,其余时刻基本上保持在 60.00 mg/L 以下。监测期间,系统出水的平均氨氮质量浓度为 0.85 mg/L,与 COD_{Cr} 的变化趋势类似,运行后期的出水氨氮浓度相比运行前期有明显的下降。运行前期(2019 年 3 月—6 月)出水氨氮质量浓度在 0.72~3.71 mg/L,平均质量浓度为 1.61 mg/L,运行后期(2019 年 7 月—2020 年 1 月)出水氨氮质量浓度在 0.03~2.15 mg/L,平均质量浓度为 0.52 mg/L,其中运行后期除了 2 次数据异常之外,基本上保持在 0.03~0.50 mg/L。

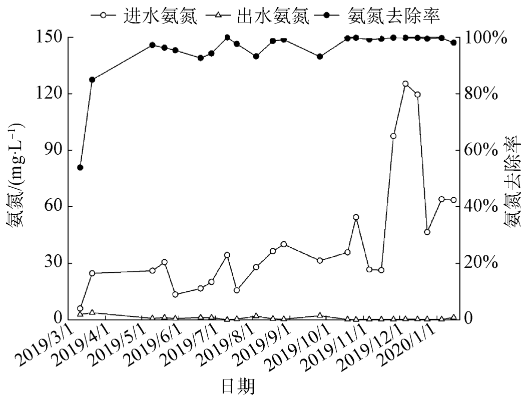

图 6　净化设施进出水氨氮变化

Fig. 6　Changes of Ammonia Nitrogen in Influent and Effluent of Purification Facilities

除了监测早期(2019 年 3 月)氨氮去除率较低(37.00%)外,其余时间氨氮去除率都一直稳定在 90.00%以上,2019 年 4 月—10 月氨氮去除率为 92.00%~99.00%,2019 年 11 月—2020 年 1 月氨氮去除率稳定在 99.50%左右。

数据表明,经过一定时期的调试运行,系统氨氮去除率稳定在 99.00%左右,出水氨氮质量浓度均在 1.00 mg/L 以下,效果稳定,且远高于设计要求。此外,系统完全成熟后,进水的氨氮浓度波动性对出水水质没有影响,可持续稳定运行,保证出水水质。

3.3　TP 的去除效果

2019 年 3 月—2020 年 1 月,进出水 TP 浓度及系统对 TP 的去除率如图 7 所示。与氨氮及 COD_{Cr} 采用在线监测不同,TP 采用定期人工采样检测。整个监测期间,系统进水 TP 的质量浓度为 6.00~22.80 mg/L,平均值为 13.14 mg/L 。经系统处理后,出水 TP 的质量浓度为 0.10~0.48 mg/L,平均值为 0.30 mg/L,出水 TP 变化趋势比较稳定,未表现出运行前后期的区别。在整个监测期间,TP 的去除率为 93.90%~99.50%,平均去除率为 97.30%,呈现出十分稳定的处理能力。

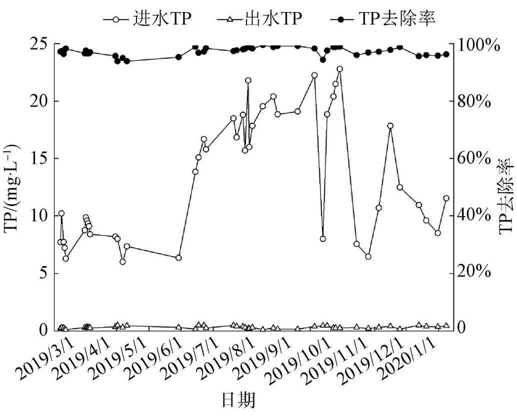

图 7　净化设施进出水 TP 变化

Fig. 7　Changes of TP in Influent and Effluent of Purification Facilities

3.4　系统各工艺单元的处理效果及贡献

系统各工艺单元的处理效果和去除率如表 2 所示。在系统正常运行状态中,CASS 工艺将进水 COD_{Cr} 平均质量浓度从 189.80 mg/L 降至 57.26 mg/L,氨氮平均质量浓度从 27.08 mg/L 降至 6.60 mg/L,TP 平均质量浓度从 13.04 mg/L 降至 3.76 mg/L,TN 平均质量浓度从 37.22 mg/L 降至 18.00 mg/L,独立平均去除率分别为 68.7%、76.0%、

70.6%和 52.1%。NCC 工艺则在 CASS 的基础上,进一步将水体 COD_{Cr}、氨氮、TP、TN 平均质量浓度降至 13.30、0.28、0.13、6.41 mg/L,独立平均去除率分别为 75.8%、95.7%、96.3%、60.8%。系统总平均去除率分别为 92.1%、99.0%、98.8%、82.4%。

表 2 系统各工艺单元出水水质对比 ($n=5$)

Tab. 2 Comparison of Water Quality in Each Process Unit ($n=5$)

指标	系统进水平均	CASS 出水平均	NCC 出水平均
COD_{Cr}/(mg·L^{-1})	189.80±20.75	57.26±3.75	13.30±1.96
氨氮/(mg·L^{-1})	27.08±1.52	6.60±0.91	0.28±0.08
TP/(mg·L^{-1})	13.04±1.21	3.76±0.41	0.13±0.03
TN/(mg·L^{-1})	37.22±3.26	18.00±2.75	6.41±0.72

各工艺单元的去除贡献占比如图 8 所示。在整个系统对水体各污染物(COD_{Cr}、氨氮、TP、TN)的去除中,CASS 单元分别贡献了 72.6%、76.4%、71.9%、62.4%的平均削减量,NCC 单元分别贡献了 27.4%、23.6%、28.1%、37.6%的平均削减量。

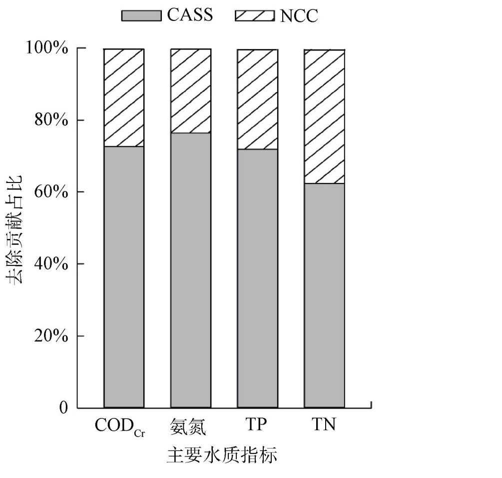

图 8 各工艺单元的去除贡献

Fig. 8 Removal Contribution of Each Process Unit and Total Process

4 讨论

4.1 NCC 系统对原 CASS 工艺的提升

CASS 水处理工艺是一种改良型的 SBR 工艺,主要应用于有脱氮除磷要求、有机污染物含量较高的污染水体,常用于城市生活污水和部分工业废水[19-22]。CASS 具有组成简单、运行灵活、可靠性好的特点,但同时也存在生物脱氮除磷效果难以提升的问题[23],此外,CASS 在实际运行中需要精确调节来适应进水水质的波动[24-25],对运行管理的要求较高。针对这一现状,工程应用中也越来越多地采用其他工艺和 CASS 的组合工艺。

本研究将 CASS 和 NCC 系统相结合,对城镇生活污水进行治理,进一步提升了对污染水体中的氨氮、TP、COD_{Cr} 的去除效果。从本项目的实际运行效果看,COD_{Cr} 的处理效能使通常的出水质量浓度为 50.00~150.00 mg/L 降至 15.00 mg/L 以下,氨氮的处理效能使出水质量浓度为 5.00 mg/L 降至 1.00 mg/L 以下,TP 的处理效能使出水质量浓度为 0.50~1.00 mg/L 降至平均值为 0.30 mg/L 以下,而且处理能力稳定,进水水质的波动对出水水质影响较小。

从各处理单元的去除率对比以及其在总污染物削减中的贡献可以看到,CASS 系统贡献 70.00%左右的削减量,NCC 系统贡献 30.00%左右的削减量。结果表明,NCC 系统适宜深度处理,在进水污染物浓度较低时(除 TP 外,均满足城镇污水处理二级排放标准),氨氮和 TP 的去除率仍可保持 95.00%以上,COD_{Cr} 和 TN 去除率可达到 60.00%~76.00%,将出水水质提升至地表水“准Ⅳ类”标准(除 TN 外,其他指标均达到Ⅳ类标准)。

4.2 炭系载体对 NC 水处理技术的提升

研究[8,26-27]表明,NC 处理技术的主要优势是处理氨氮、TP 效果高,以及应对水质冲击的能力好,本项研究也同样证明了 NC 水处理技术的这些优势。在进行了生物酶木炭的工艺改进之后,NCC 系统的处理能力得到进一步提升,对氨氮、TP 的处理能力都稳定维持在 90.00%以上。而且,在运行过程中,系统处理能力可以随着系统熟化进一步增长,结果表明,在运行后期系统完全成熟后,对氨氮和 TP 的处理能力可以维持在 99.00%以上。

根据对现场运行效果的观察和分析,推测 NCC 系统能长期维持高处理效能的原因可能在于:(1)填料表面固定生物酶,有利于保持填料的处理活性,因水质变化而带来的冲击更小;(2)填料的高孔隙度和独特的充氧效率,使得系统中的微生物的生长和群落演替比通常情况下更为迅速,系统因此具有一定的成长性,可以在运行后期进一步提升处理效率。

4.3 NCC 系统可供改进的方向

(1)根据本项目的运行结果,NCC 系统对 TN 的处理效能没有达到氨氮、TP 的水平,这可能是系统的好氧特性导致对硝酸盐的处理能力不高。虽然本项目与具有一定反硝化能力的 CASS 工艺进行了组合,但 CASS 工艺前置,使得聚合深度处理池产生的硝酸盐未能完全被处理。NCC 系统下一步可以在 TN 的去除能力上进行改进。

(2)虽然 NCC 系统表现出对微生物良好的促进能力,但对具体微生物组成以及演替规律仍知之甚少[5],微生物群落因处理污水的不同而产生的响应仍属未知。而污水处理中微生物的群落变化是解释工艺效能的重要环节,在了解其变化规律后,可以利用填料材料和营养来诱导功能微生物的生长[28]。NCC 系统下一步可以在系统功能微生物的组成和演替规律上进行探索,以进一步对生物酶木炭和系统进行改进。

5　结论与展望

城镇生活污水经过 CASS 系统+NCC 系统的组合工艺处理后,COD_{Cr} 去除率达到 95.00%,氨氮和 TP 去除率达到 99.00%,在进水负荷波动较大的情况下,出水主要水质指标均到达设计目标。组合工艺中,CASS 系统贡献了约 70.00%的平均削减量,NCC 系统则在其基础上进一步去除 60.00%以上的 COD_{Cr}、90.00%以上的氨氮和 TP,远远超过了设计出水的一级 A 标准,达到地表Ⅳ类水质标准。

运行结果表明,NCC 系统对生活污水具有良好的深度处理效果。将 NCC 系统与 CASS、SBR 等前处理工艺相组合,具有处理效率高、运行管理简单方便、对周围环境影响小、生态景观等优点,可在生活污水处理、黑臭水体治理等领域有广泛的应用。

参考文献

[1] 陈勇. 地表水体水质自然净化方法研究及应用[J]. 人民珠江, 2018, 39(2): 69-72.

[2] 许少华, 翁曼婷. 利用稻壳炭及咖啡渣作为生活污水之前处理滤材之可行性研究[J]. 农业工程学报, 2020, 66(4): 14-20.

[3] NARAIN-FORD D M, BARTHOLOMEUS R P, DEKKER S C, et al. Natural purification through soils: Risks and opportunities of sewage effluent reuse in sub-surface irrigation[J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 2020, 250: 85-117. DOI: 10.1007/398_2020_49.

[4] MATSUMOTO S. The conception and execution of improved river water quality using a newly developed purification method: The Shimanto-gawa system[J]. UNEPIETC Newslett, 1997, 8: 3-7.

[5] NIU S Q, FUKUSHIMA J, JIANG Y, et al. Analysis of bacterial community structure in the natural circulation system wastewater bioreactor by using a 16S rRNA gene clone library [J]. Microbiology and Immunology, 2006, 50(12): 937-950. DOI: 10.1111/j.1348-0421.2006.tb03870.x.

[6] Institute for International Cooperation, Japan International Cooperation Agency. Approaches for systematic planning of development projects: Water resources[R]. Tokyo: Institute for International Cooperation, Japan International Cooperation Agency, 2005.

[7] 杨敏. 自然循环污水处理技术的应用与创新[J]. 环境科学导刊, 2012, 31(2): 56-57.

[8] 朱建标. 自然循环污水处理技术在河道污水处理的应用[J]. 南昌工程学院学报, 2010, 29(4): 67-70.

[9] 余杰, 田宁宁. 自然循环式污水处理系统及应用实例研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(3): 79-84.

[10] 江鹰, 松本聪. 一种用于污水处理的改性生物酶木炭填料: CN104528947A[P]. 2015-04-22.

[11] 孙永利. 城镇污水处理提质增效的内涵与思路[J]. 中国给水排水, 2020, 36(2): 1-6.

[12] 王旭, 王永刚, 孙长虹, 等. 城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1331-1340.

[13] 王家卓, 胡应均, 张春洋, 等. 对我国合流制排水系统及其溢流污染控制的思考[J]. 环境保护, 2018, 46(17): 14-19.

[14] 赵晔. 城市黑臭水体整治实现长制久清存在的风险与对策[J]. 给水排水, 2019, 55(4): 44-49.

[15] 胡爽, 连佐平. 重庆市城镇居民生活区污水水质特征分析[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(8): 117-119.

[16] HUGGINS T M, HAEGER A, BIFFINGER J C, et al. Granular biochar compared with activated carbon for wastewater treatment and resource recovery[J]. Water Research, 2016, 94: 225-232. DOI: 10.1016/j.watres.2016.02.059.

[17] 松本聰. 四万十川方式による水圏環境の浄化と新たなる物質循環型地域社会の創造に向けて[J]. 地球環境, 2003, 8(1): 97-104.

[18] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[19] YANG J, LIANG W L, HUANG F C. Review of SBR process in effluent treatment[C]. E3S Web of Conferences, EDP Sciences, 2021.

[20] LIU M M, CHEN M X, QI R, et al. ASM simulation optimization and practical application on upgrading of urban sewage treatment plant in cold region[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(4): 1119-1128.

[21] 李锐辉. CASS 工艺在城镇污水处理厂的应用[J]. 广东化

工, 2020, 47(4): 134-136.
[22] 刘康, 薛念涛, 李建民, 等. CASS 反应器内反硝化聚磷菌处理生活污水的性能[J]. 环境工程学报, 2018, 12(9): 2483-2489.
[23] 马建强, 王广卿. CASS 工艺特点及优缺点分析[J]. 河南建材, 2011(4): 94-95.
[24] 李宏罡, 张玲, 张宝杰. 运用调整 CASS 工艺运行周期策略处理不同水质污水的研究[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(5): 115-117.
[25] 吴飞, 王立亮, 苏忆波, 等. 曝气方式及排水比对 CASS 稳定化运行的影响[J]. 水处理技术, 2019, 45(8): 120-124.
[26] MATSUMOTO S, ISHIKAWA D, SAEKI G, et al. Microbial population dynamics and community structure during the formation of nitrifying granules to treat ammonia-rich inorganic wastewater[J]. Microbes Environment, 2010, 25(3): 164-170. DOI: 10.1264/jsme2.ME10107.
[27] 孙正庭, 李锋. 自然循环水处理系统的应用试验[J]. 能源环境保护, 2010, 24(3): 20-23.
[28] HE Q, SONG Q, ZHANG S, et al. Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in an aerobic granular sequencing batch reactor with mixed carbon sources: Reactor performance, extracellular polymeric substances and microbial successions[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 331: 841-849. DOI: 10.1016/j.cej.2017.09.060.

(上接第 21 页)

[14] 孙东晓, 董志强, 刘学明, 等. 污泥基生物炭的制备技术及环境应用与研究热点[J]. 净水技术, 2021, 40(8): 16-25.
[15] WEI L, ZHU F, LI Q. Development, current state and future trends of sludge management in China: Based on exploratory data and CO_2 - equivalent emissions analysis [J]. Environment International, 2020, 144(3): 106093. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106093.
[16] 李伟, 李让玲, 李博文, 等. 水热预处理对不同污泥性质及厌氧消化性能的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 326-333.
[17] 安叶, 张义斌, 黎攀, 等. 我国市政生活污泥处置现状及经验总结[J]. 给水排水, 2021, 57(s1): 94-98.
[18] 徐正巧. 污水处理厂污泥处理资源化利用技术探究[J]. 节能与环保, 2020(3): 64-65.
[19] 黄岚, 封莉, 杜子文, 等. 我国城市污泥土地利用瓶颈问题分析与对策研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(20): 31-36.
[20] 周玲, 廖传华. 污泥建材化利用的现状[J]. 中国化工装备, 2019, 21(4): 3-6.
[21] 郝晓地, 郭小媛, 时琛, 等. 污泥焚烧灰分磷回收 Ash Dec 工艺及其研究进展[J]. 中国给水排水, 2022, 38(14): 17-24.
[22] 刘贝贝, 林伟龙. 环境影响评价中公众参与问题的应对策略分析[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(8): 139-141.
[23] ELMI A, AL-KHALDY A, ALOLAYAN M. Sewage sludge land application: Balancing act between agronomic benefits and environmental concerns [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 250: 119512. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119512.
[24] FANG L, WANG Q, LI J S, et al. Feasibility of wet-extraction of phosphorus from incinerated sewage sludge ash (ISSA) for phosphate fertilizer production: A critical review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2020, 51(9): 939-971. DOI: 10.1080/10643389.2020.1740545.
[25] 次瀚林, 王先恺, 董滨. 不同污泥干化焚烧技术路线全链条碳足迹分析[J]. 净水技术, 2021, 40(6): 77-82, 99.
[26] 赵发敏, 李兴杰, 冯楠, 等. 污泥处理处置技术的应用研究及进展[J]. 有色冶金节能, 2021, 37(6): 50-54.
[27] JOSEPH C A, KHIARI L, GALLICHAND J, et al. Influence of sludge incineration ash on ryegrass growth and soil phosphorus status[J]. Pedosphere, 2019, 29(1): 70-81.
[28] 刘宇佳, 王飞, 赵旭东. 污泥干化焚烧新型余热回收系统的热力性能分析[J]. 热能动力工程, 2020, 35(5): 245-252.
[29] LIANG Y, XU D H, FENG P, et al. Municipal sewage sludge incineration and its air pollution control[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 295: 126456. DOI:10.1016/J.JCLEPRO.2021.126456.
[30] 王飞, 张盛, 王丽花. 燃煤耦合污泥焚烧发电技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 82-94.
[31] 吴江, 余凌洁, 张会, 等. 污泥与煤炭掺烧的特性及其研究进展[J]. 上海电力学院学报, 2019, 35(2): 107-110, 148.
[32] SUN Y, CHEN G, YAN B, et al. Behaviour of mercury during Co-incineration of sewage sludge and municipal solid waste[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 253: 119969. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.126456.
[33] 潘振, 梁志超, 田冬梅, 等. 广西城市污水处理厂污泥产生及处置现状分析[J]. 能源环境保护, 2020, 34(2): 105-108.
[34] 李尔, 曾祥英. 武汉市主城区污水厂污泥处理处置现状及展望[J]. 中国给水排水, 2021, 37(18): 8-13.
[35] 陈懋喆. 欧盟 15 国污水污泥产生量与处理处置方法对比[J]. 能源环境保护, 2019, 33(1): 6-12.
[36] XU J C, LI P, CAO H, et al. Application status of co-processing municipal sewage sludge in cement kilns in China [J]. Sustainability, 2019, 11(12): 3315. DOI: 10.3390/su11123315.
[37] 畅萧, 曾薇, 王保贵, 等. 从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷[J]. 环境科学, 2019, 40(9): 4169-4176.
[38] 胡维杰. 城镇污水污泥燃煤电厂协同焚烧技术解析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(8): 24-31. .
[39] 郝晓地, 陈奇, 李季, 等. 污泥焚烧无须顾虑尾气污染物[J]. 中国给水排水, 2019, 35(10): 8-14.
[40] 应基光, 林莉峰, 邵钦. 基于鼓泡流化床的污泥焚烧保护控制[J]. 中国给水排水, 2021, 37(10): 133-137.
[41] 杭世珺, 关春雨, 戴晓虎, 等. 污泥水泥窑协同处置现状与展望(上)[J]. 给水排水, 2019, 55(4): 39-43, 49.