



组合CRI工艺对印染二级生化出水的深度脱氮效果

陈 佼^{1,2}, 李晓媛¹, 任燕玲¹, 刘 欢¹, 刘浩霖¹, 兰伟伟¹, 陆一新^{1,2,3}

(1. 成都工业学院材料与环境工程学院, 四川成都 611730; 2. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川成都 611756; 3. 海天水务集团股份有限公司, 四川成都 610200)

[摘要] 采用好氧+厌氧组合人工快渗(OCRI+ACRI)工艺处理印染二级生化出水, 考察了运行过程中氮素污染物的迁移转化规律及脱氮效果。结果表明, 组合工艺运行28 d后可成功启动部分亚硝化和厌氧氨氧化, 稳定运行期间COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN平均去除率分别为87.2%、99.0%、96.9%, 出水浓度均达到《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB 4287—2012)的直接排放标准。组合CRI工艺共运行180 d, OCRI反应器内主要发生部分亚硝化, 其对COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN的去除率分别为87.3%、60.1%、5.2%。ACRI反应器内主要发生厌氧氨氧化, 其对COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN的去除率分别为12.7%、39.9%、94.8%。

[关键词] 印染废水; 深度脱氮; 部分亚硝化; 厌氧氨氧化; 人工快渗

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)01-0071-06

Advanced nitrogen removal performance of secondary biochemical effluent of printing and dyeing wastewater by combined CRI process

CHEN Jiao^{1,2}, LI Xiaoyuan¹, REN Yanling¹, LIU Huan¹, LIU Haolin¹, LAN Weiwei¹, LU Yixin^{1,2,3}

(1. School of Materials and Environmental Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu 611730, China; 2. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 3. Haitian Water Group Co., Ltd., Chengdu 610200, China)

Abstract: Aerobiotic and anaerobic combined constructed rapid infiltration (OCRI+ACRI) process was used to treat the secondary biochemical effluent of printing and dyeing wastewater. The migration and transformation rules of nitrogen pollutants and the nitrogen removal performance during the operation were investigated. The results showed that partial nitrification and anammox could be successfully started after 28 days of operation. The average removal rates of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN were 87.2%, 99.0% and 96.9% respectively during the stable operation period. The effluent met the direct emission standard of Discharge Standard of Water Pollutants for Dyeing and Finishing of Textile Industry (GB 4287—2012). During the 180 days of operation of the combined CRI process, partial nitrification occurred in OCRI reactor, and the removal rates of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN were 87.3%, 60.1% and 5.2%, respectively. Anammox mainly occurred in ACRI reactor, and the removal rates of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN were 12.7%, 39.9% and 94.8%, respectively.

Key words: printing and dyeing wastewater; advanced nitrogen removal; partial nitrification; anammox; constructed rapid infiltration

印染废水作为一类典型的难降解工业废水, 具有水质复杂、可生化性差、色度高、碱度大等特点。部分印染工艺中还包含了活性染料印花工序, 需采用尿素作为吸湿剂和助溶剂, 导致产生的废水中含

有大量氨氮^[1]。目前, A^2O (厌氧-缺氧-好氧)^[2]、电Fenton+AGS(好氧颗粒污泥)^[3]、水解酸化+MBBR(移动床生物膜反应器)^[4]、微电解耦合非均相Fenton法^[5]等生化工艺已被成功应用于处理印染废水

中的COD、SS、色度等,但是这些工艺难以实现氮素污染物的高效去除,致使二级生物处理后的出水中仍含有不同浓度的含氮污染物,废水若未经深度处理就直接排入江河湖泊,将对水生态环境造成严重危害^[6]。

由于前端处理工艺已去除大部分COD,印染二级生化出水中COD/NH₄⁺-N通常低于3,属于典型的低C/N废水^[7]。传统生物脱氮工艺在处理该类废水时,因缺乏有机碳源而使得反硝化过程无法顺利发生,导致最终的脱氮效率较低^[8]。为解决低C/N废水脱氮效率低的问题,常通过投加甲醇、乙酸、葡萄糖等外源有机物作为碳源补充剂^[9],但该方法存在经济成本高、操控复杂、二次污染风险大等弊端。因此,探寻低C/N废水深度脱氮的新工艺方法对印染废水的高效低耗处理具有重要的现实意义。

人工快渗(constructed rapid infiltration, CRI)工艺是一种以渗滤性能良好的滤料填充固定床生物膜体系为反应主体的新型废水生态处理技术,具有基建投资少、工艺操作简便、运营成本低等优势,对COD、NH₄⁺-N、SS等污染物均能表现出良好的去除效能^[10],已被广泛应用于城镇生活污水、受污染地表水、农村分散污水的处理^[11-13],但目前将其应用于印染废水处理领域的研究尚未见报道。

鉴于此,本研究将启动好氧(O)+厌氧(A)组合CRI工艺用于印染二级生化出水的处理,考察运行过程中氮素污染物的迁移转化规律及反应机制,并探讨组合工艺的脱氮效果及其对COD、NH₄⁺-N、TN的去除贡献,以期对印染废水的深度脱氮提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 实验装置

组合CRI工艺装置见图1。

组合CRI由好氧CRI反应器(OCRI)和厌氧CRI反应器(ACRI)串联而成,中间设有中转水箱和蠕动泵。OCRI、ACRI反应器均采用PVC材料制成,内部滤料层采用河砂、贝壳砂、沸石砂(粒径0.5~1.0 mm,体积比3:1:1)混匀而成,滤料层上下各设一层砾石层(粒径5~15 mm,厚2.5 cm)。OCRI反应器柱高、滤料层高、内径依次为100、75、16 cm,采用间歇式下向流布水,水力负荷为1.0 m³/(m²·d),每天运行2个周期,湿干比(淹水和落干的时间比)为1:3。ACRI

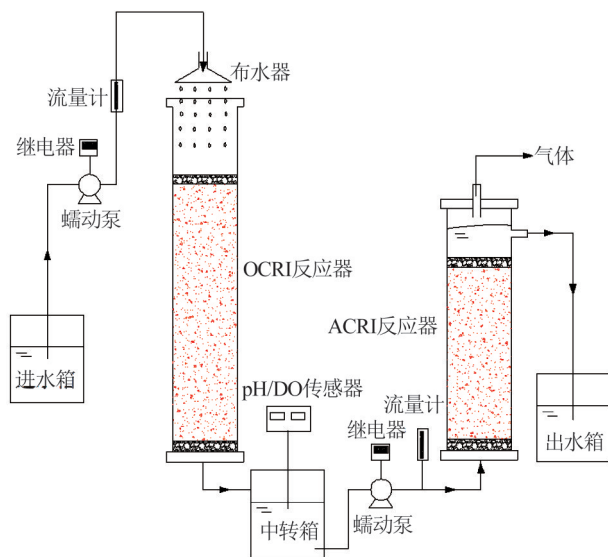


图1 组合CRI工艺装置

Fig. 1 Device diagram of combined CRI process

反应器柱高、滤料层高、内径依次为70、50、16 cm,采用OCRI反应器出水作为进水,进水方式为连续式上向流,上方设有出水口和集气口。实验期间温度为(25±2)℃。

1.2 实验用水与接种污泥

实验用水取自成都某工业园区印染废水处理站(采用“水解酸化+接触氧化”工艺)的二级生化出水,COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N质量浓度范围分别为80.4~101.4 mg/L、40.1~51.3 mg/L、0~0.3 mg/L、0~2.5 mg/L,pH为7~8,其中NH₄⁺-N浓度较高,需进一步深度脱氮才能达标排放。

OCRI、ACRI内滤料层的接种污泥分别来自实验室稳定运行的部分亚硝化污泥和厌氧氨氧化污泥,MLVSS分别为5 000、7 500 mg/L。

1.3 分析方法

废水中COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N的浓度分别采用重铬酸钾法、纳氏试剂分光光度法、N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法、酚二磺酸光度法测定^[14],pH采用雷磁PHS-3C⁺酸度计检测,TN浓度采用NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N浓度之和表示。

2 结果与讨论

2.1 OCRI反应器的脱氮性能

废水进入OCRI反应器后的氮浓度变化情况见图2。

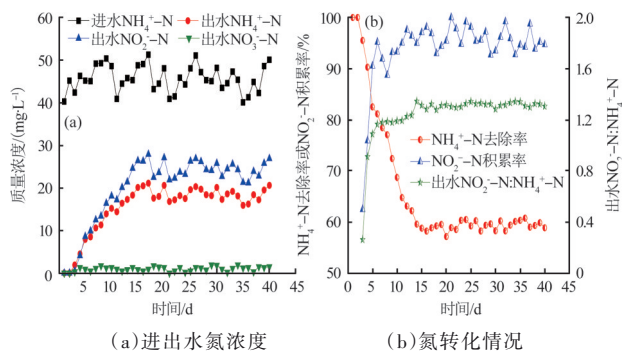


图2 OCRI反应器内氮浓度变化

Fig. 2 Variations of nitrogen concentration in OCRI reactor

由图2可知,启动初期(1~2 d)反应器出水中未检测到 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N ,这是由于该时期OCRI反应器滤料层具有充足的吸附点位,能充分截留或吸附污染物^[10]。随着吸附点位的逐渐饱和,OCRI反应器逐步进入部分亚硝化适应期(3~13 d),因为接种的部分亚硝化污泥起初不能良好地适应新生存环境^[15],所以处理效率较低,出水 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 浓度逐渐呈升高趋势;随着接种污泥对新环境的逐渐适应,从第14天开始OCRI反应器进入部分亚硝化稳定期,该阶段 NH_4^+-N 、TN 平均去除率分别为 59.3%、5.6%, NO_2^--N 平均积累率为 95.9%,出水 NO_2^--N 与 NH_4^+-N 的质量比为 1.28~1.34,能满足ACRI反应器的进水水质需求^[16]。

OCRI反应器内主要发生部分亚硝化反应,该过程的反应方程式如下: $\text{NH}_4^++1.5\text{O}_2\longrightarrow\text{NO}_2^-+\text{H}_2\text{O}+2\text{H}^+$ 。与传统硝化过程不同,部分亚硝化仅需氧化 60% 左右的 NH_4^+-N 为 NO_2^--N ,可节省至少 50% 以上的氧耗^[17],因而OCRI反应器无需人工曝气供氧,仅依靠淹水、落干交替运行方式实现高效复氧,即可满足部分亚硝化过程对溶解氧的需求^[10],大大节约了运行成本。

接种部分亚硝化污泥后形成的生物膜中,富集了较多的氨氧化菌(AOB),而亚硝酸盐氧化菌(NO₂)处于弱势地位,废水中的 NH_4^+-N 被 AOB 氧化为 NO_2^--N 后不能被 NOB 进一步氧化为 NO_3^--N ,因而出现 NO_2^--N 积累现象^[18]。

2.2 OCRI+ACRI组合工艺的脱氮性能

从第19天起以OCRI反应器的出水作为ACRI反应器的进水,运行过程中氮浓度变化和去除情况见图3。

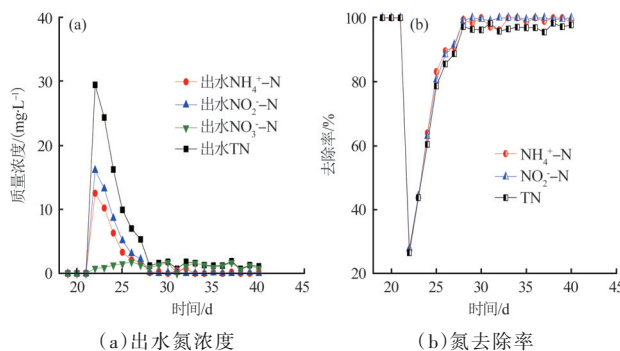
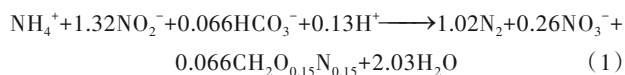


图3 OCRI+ACRI组合工艺的脱氮效果

Fig. 3 Nitrogen removal performance of combined process

由图3可知,在ACRI反应器的启动初期(19~21 d)同样出现了 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 完全去除的现象^[10];从第22天起出水 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、TN 质量浓度急剧升高,新接种污泥的不适应性开始显现出来;随着厌氧氨氧化污泥对新环境的逐渐适应,出水 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、TN 质量浓度逐渐降低^[19],运行至第28天起出水氮浓度变化趋于稳定,组合工艺实现成功启动。稳定运行期间出水 NH_4^+-N 、TN 平均质量浓度分别为 0.18、1.3 mg/L,平均去除率分别为 99.0%、96.9%,组合CRI工艺对印染二级生化出水表现出良好的脱氮效果。

由于ACRI内滤料层采用厌氧氨氧化污泥接种,其形成的生物膜中含有大量的厌氧氨氧化菌(AAOB),为厌氧氨氧化的发生提供了基础。当进水 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 质量浓度比在 1:1.32 左右时,AAOB在厌氧条件下可利用 NH_4^+-N 作为电子供体、 NO_2^--N 作为电子受体进行厌氧氨氧化^[20],将 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 同步转化为 N_2 而实现高效脱氮,其反应式如下:



厌氧氨氧化是近年来已知的最具发展潜力的新型生物脱氮技术,该过程以 NH_4^+-N 作为电子供体,不需要投加外源有机物来补充碳源,既能节省运行成本,又能避免因药剂投加引发的二次污染问题,同时ACRI反应器不产剩余污泥,减轻了污泥处理负担,是一种绿色、经济、高效的脱氮技术。近年来关于厌氧氨氧化的报道日益增多,李海玲等^[21]通过温度和沉淀时间的调控实现了SBR反应器厌氧氨氧化,稳定运行期间 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、TN 去除率分别

达到86%、98%、85%。Yiyu LI等^[22]在序批式反应器内接种来自膨胀颗粒污泥床(EGSB)反应器中的厌氧氨氧化颗粒污泥,在最优运行条件下出水TN质量浓度小于1 mg/L, TN去除率高于92.8%。Peng WU等^[23]采用厌氧折流板反应器(ABR)分别启动单级和二级厌氧氨氧化工艺,稳定运行期TN去除率分别为86%~92%和81%~87%。本研究在OCRI反应器实现部分亚硝化,同时在ACRI反应器内接种厌氧氨氧化污泥,提供了适宜的进水条件和充足的功能菌群,为实现部分亚硝化耦合厌氧氨氧化深度脱氮奠定了基础。

2.3 组合工艺的COD去除效果

组合CRI工艺对废水中COD的去除效果见图4。

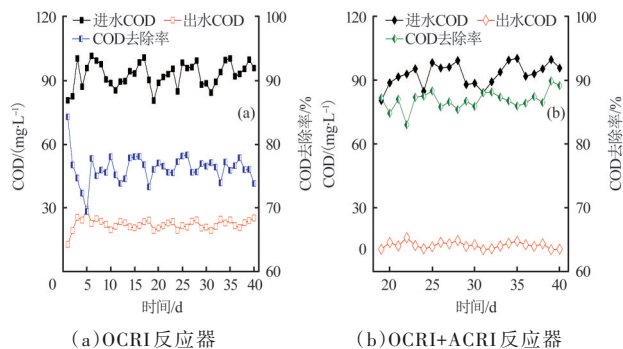


图4 组合工艺对COD的去除效果

Fig. 4 COD removal performance of combined process

由图4(a)可知,OCRI反应器的出水平均COD为22.3 mg/L,平均去除率达到76.1%,可见COD在OCRI反应器内已被大部分去除,此时C/N进一步降低。如果出水直接用于反硝化,将因缺少碳源而导致脱氮效率低,传统异养反硝化不适用于该类型废水的处理^[24];由图4(b)可知,OCRI反应器的出水进入ACRI反应器后,稳定运行期出水平均COD仅为12 mg/L,平均去除率达到87.2%,这表明COD在ACRI反应器内可被进一步去除而减少,组合CRI工艺在高效脱氮的同时也表现出良好的有机物去除效果。

ACRI反应器内发生的厌氧氨氧化脱氮过程并不需要有机物作为碳源,但本研究中COD在ACRI反应器内仍存在一定的去除量,这说明ACRI反应器内除厌氧氨氧化外,还可能存在其他异养脱氮途径^[25]。图5反映的是ACRI反应器内 $\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ (NH_4^+-N

去除量)、 $\Delta\text{NO}_2^--\text{N}$ (NO_2^--N 去除量)、 $\Delta\text{NO}_3^--\text{N}$ (NO_3^--N 产生量)的计量比变化,可以看到,稳定运行期间 $\Delta\text{NO}_2^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\Delta\text{NO}_3^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 分别为1.28~1.37、0~0.09,其中 $\Delta\text{NO}_2^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 值的范围与厌氧氨氧化的理论化学计量比1.32:1较为接近,而 $\Delta\text{NO}_3^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 值的范围远低于相应的理论化学计量比0.26:1。结合COD的去除可以推断ACRI反应器内还可能发生了异养反硝化,异养反硝化菌(DNB)在厌氧条件下以厌氧氨氧化产生的 NO_3^--N 作为反应基质,将其还原为 N_2 ,使得 $\Delta\text{NO}_3^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 有所降低^[26]。但由于该阶段进入ACRI反应器的COD浓度本身就较低,能被利用的COD也十分有限,因而厌氧氨氧化依然是该反应器内的主要脱氮途径,异养反硝化的协同存在提高了组合工艺的最终脱氮效率^[27]。

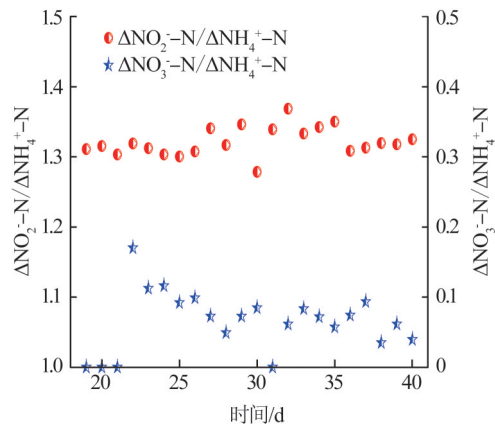


图5 ACRI反应器内氮变化计量比

Fig. 5 Metering ratio of nitrogen change in ACRI reactor

2.4 污染物去除分析

采用稳定运行的组合CRI工艺处理印染二级生化出水,共运行180 d,计算得出OCRI反应器对COD、 NH_4^+-N 、TN的去除率分别为87.3%、60.1%、5.2%,ACRI反应器对COD、 NH_4^+-N 、TN的去除率分别为12.7%、39.9%、94.8%,稳定运行期间出水COD、 NH_4^+-N 、TN质量浓度范围分别为10.1~14.5 mg/L、0~0.7 mg/L、0.7~1.9 mg/L,均达到《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB 4287—2012)直接排放标准。

由此可见,COD、 NH_4^+-N 的去除主要发生在OCRI反应器内,而TN的去除主要发生在ACRI反应器内。传统生物脱氮工艺和组合人工快渗工艺的主

要脱氮途径见图6。

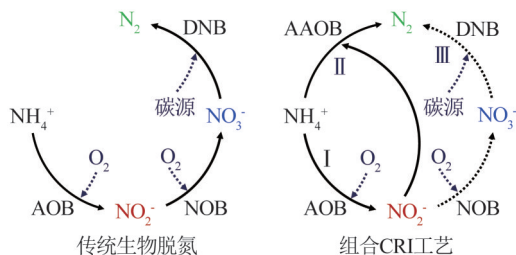


图6 主要脱氮途径

Fig. 6 Main pathways of nitrogen removal

由图6可知,与传统生物脱氮工艺不同,OCRI反应器的设置旨在为ACRI反应器提供适宜的进水条件,其主要脱氮途径为部分亚硝化(途径I),该过程对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率较高而对TN的去除贡献较低^[28];ACRI反应器的设置旨在将部分亚硝化出水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 通过厌氧氨氧化(途径II)去除,同时少量 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 通过异养反硝化(途径III)去除,因而在有机碳源缺乏的前提下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN均能得到高效去除^[29]。部分亚硝化、厌氧氨氧化、反硝化协同技术为组合CRI工艺处理印染二级生化出水提供了一条新的脱氮方式。

3 结论

印染二级生化出水经好氧+厌氧组合CRI(OCRI+ACRI)工艺处理后,COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN均能被高效去除,实现深度脱氮,出水水质达到排放标准。OCRI反应器对COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 表现出良好的去除效果,其主要脱氮途径为部分亚硝化。ACRI反应器对TN表现出良好的去除效果,其主要脱氮途径为厌氧氨氧化。除部分亚硝化耦合厌氧氨氧化脱氮外,ACRI反应器内还存在异养反硝化协同脱氮,为实现印染二级生化出水的深度脱氮创造了条件。

参考文献

[1] 古航坤,黄斌,罗赵青,等. 厌氧与缺氧/好氧交替式SBR处理印染废水[J]. 工业水处理, 2021, 41(1): 83-87.
GU Hangkun, HUANG Bin, LUO Zhaoqing, et al. Anaerobic and anoxic/aerobic alternative SBR treatment for printing and dyeing wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(1): 83-87.

[2] 张少朋,字进远,王吉,等. 印染有机废水处理A²/O工艺设计[J]. 中国沼气, 2020, 38(4): 39-44.
ZHANG Shaopeng, ZI Jinyuan, WANG Ji, et al. Design of A²/O process for printing and dyeing organic wastewater treatment[J]. China

Biogas, 2020, 38(4): 39-44.

[3] LIU Yingrui, LI Kai, XU Weiyang, et al. GO/PEDOT: NaPSS modified cathode as heterogeneous electro-Fenton pretreatment and subsequently aerobic granular sludge biological degradation for dye wastewater treatment[J]. Science of the Total Environment, 2020, 700: 134536.

[4] 杨楠楠,刘永红,王宁,等. 水解酸化-MBBR生物处理印染废水工艺[J]. 西安工程大学学报, 2020, 34(4): 38-42.
YANG Nannan, LIU Yonghong, WANG Ning, et al. Printing and dyeing wastewater treatment by hydrolysis acidification-MBBR biological technology[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2020, 34(4): 38-42.

[5] 王震,王长智,许青兰,等. 微电解耦合非均相Fenton法处理印染废水膜浓缩液[J]. 工业水处理, 2021, 41(4): 48-51.
WANG Zhen, WANG Changzhi, XU Qinglan, et al. Treatment of membrane concentrate from dyeing wastewater by micro-electrolysis coupling heterogeneous Fenton-like system[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(4): 48-51.

[6] VAN METER K J, VAN CAPPELLEN P, BASU N B. Legacy nitrogen may prevent achievement of water quality goals in the Gulf of Mexico[J]. Science, 2018, 360(6387): 427-430.

[7] HUANG Liping, YE Jiangyu, XIANG Hongwei, et al. Enhanced nitrogen removal from low C/N wastewater using biodegradable and inert carriers: Performance and microbial shift[J]. Bioresource Technology, 2020, 300: 122658.

[8] 钱梦洁,李兴强,李军. 丝瓜络和聚氨酯组合填料深度脱氮效果[J]. 中国给水排水, 2020, 36(15): 73-77.
QIAN Mengjie, LI Xingqiang, LI Jun. Advanced denitrification efficiency of loofah and polyurethane composite filler[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(15): 73-77.

[9] 付昆明,杨宗玥,刘凡奇,等. 碳源种类对农村污水反硝化过程脱氮效果的影响[J]. 环境工程学报, 2020, 14(9): 2331-2338.
FU Kunming, YANG Zongyue, LIU Fanqi, et al. Effect of carbon sources on nitrogen removal in denitrification process of rural wastewater[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(9): 2331-2338.

[10] CHEN Jiao, LU Yixin, CHENG Jun, et al. Effect of starvation on the nitrification performance of constructed rapid infiltration systems[J]. Environmental Technology, 2019, 44(11): 1408-1417.

[11] WANG Dongbo, ZHANG Ziyun, LI Xiaoming, et al. A full-scale treatment of freeway toll-gate domestic sewage using ecology filter integrated constructed rapid infiltration[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(6): 827-831.

[12] XU Wenlai, YANG Yanna, CHENG Cheng, et al. Treat Phoenix River water by constructed rapid infiltration system[J]. Journal of Coastal Research, 2015, 73: 386-390.

[13] 林明,李建,骆灵喜,等. 人工快渗一体化设备在农村污水处理中的应用[J]. 环境工程, 2017, 35(5): 44-47.
LIN Ming, LI Jian, LUO Lingxi, et al. Application of constructed

- rapid infiltration integrated equipment for rural wastewater treatment[J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(5): 44-47.
- [14] 国家环境保护总局. 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: 210-280.
- State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis method [M]. 4 edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 210-280.
- [15] CHEN Jiao, LU Yixin, OUYANG Zhiqiang, et al. Regulation of partial nitrification in constructed rapid infiltration system and analysis of microbial community structure [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, 29(1): 33-43.
- [16] 陈佼, 陆一新, 张建强, 等. CRI系统部分亚硝化的启动及菌群结构分析[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(1): 72-79.
- CHEN Jiao, LU Yixin, ZHANG Jianqiang, et al. Partial nitrification in CRI system and analysis of microbial community structure [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(1): 72-79.
- [17] YE Jiongjiang, LIU Jianyong, YE Min, et al. Towards advanced nitrogen removal and optimal energy recovery from leachate: A critical review of anammox-based processes [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2020, 50(6): 612-653.
- [18] HU Wenyong, ZHOU Yu, MIN Xiaobo, et al. The study of a pilot-scale aerobic/Fenton/anoxic/aerobic process system for the treatment of landfill leachate [J]. *Environmental Technology*, 2018, 39(15): 1926-1936.
- [19] 陈佼, 陆一新, 汪锐, 等. 人工快渗处理系统厌氧氨氧化的启动及菌群结构分析[J]. *环境工程*, 2019, 37(1): 50-55.
- CHEN Jiao, LU Yixin, WANG Rui, et al. Start-up of anaerobic ammonia oxidation in CRI system and analysis of bacterial community structure [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(1): 50-55.
- [20] XU Dongdong, YING Siying, WANG Yihang, et al. A novel SAD process: Match of anammox and denitrification [J]. *Water Research*, 2021(11): 116874.
- [21] 李海玲, 李冬, 张杰, 等. 调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行 [J]. *环境科学*, 2019, 40(2): 837-844.
- LI Hailing, LI Dong, ZHANG Jie, et al. Adjusting temperature and settling time to achieve ANAMMOX particles rapid start-up and stable operation [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(2): 837-844.
- [22] LI Yiyu, YU Tao, KANG Da, et al. Sources of anammox granular sludge and their sustainability in treating low-strength wastewater [J]. *Chemosphere*, 2019, 226: 229-237.
- [23] WU Peng, ZHANG Xingxing, WANG Xinzhu, et al. Characterization of the start-up of single and two-stage Anammox processes with real low-strength wastewater treatment [J]. *Chemosphere*, 2020, 245: 125572.
- [24] 吴春雷, 荣懿, 刘晓鹏, 等. 基于分区供氧与溶解氧调控的低 C/N 比污水短程硝化反硝化 [J]. *环境科学*, 2019, 40(5): 2310-2316.
- WU Chunlei, RONG Yi, LIU Xiaopeng, et al. Partial nitrification and denitrification of low C/N ratio sewage based on zoning oxygen and dissolved oxygen control [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5): 2310-2316.
- [25] ZHANG Fangzhai, PENG Yongzhen, WANG Shuying, et al. Efficient step-feed partial nitrification, simultaneous Anammox and denitrification (SPNAD) equipped with real-time control parameters treating raw mature landfill leachate [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 364: 163-172.
- [26] WANG Bo, GONG Xiaofei, PENG Yongzhen. Simultaneous anammox-denitrification process and its emerging extensions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 415: 128380.
- [27] LIU Wei, NASRY A A N B, ZHAO Jianqiang, et al. Start-up of the simultaneous nitrification, anammox, and denitrification (SNAD) reactor and efficacy of a small amount of organic carbon [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2019, 230(11): 256.
- [28] SHARP R, KHUNJAR W, DALY D, et al. Nitrogen removal from water resource recovery facilities using partial nitrification, denitrification-anaerobic ammonia oxidation (PANDA) [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 724: 138283.
- [29] ZHOU Shun, SONG Zhuangzhuang, SUN Zhulong, et al. The effects of undulating seasonal temperature on the performance and microbial community characteristics of simultaneous anammox and denitrification (SAD) process [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 321: 124493.
- [作者简介] 陈佼(1987—), 博士, 副教授。电话: 13540814275, E-mail: 401603414@qq.com。通讯作者: 陆一新, 博士, 教授。E-mail: chjien@foxmail.com。
- [收稿日期] 2021-11-22(修改稿)