

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.17.013

HRT对多级A/O耦合流离生化工艺低温脱氮的影响

王帆¹, 李军², 艾胜书¹, 康华¹, 聂泽兵^{1,3}, 边德军^{1,3}

(1. 长春工程学院 吉林省城市污水处理重点实验室, 吉林 长春 130012; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 3. 东北师范大学 吉林省城市污水处理与水质保障科技创新中心, 吉林 长春 130117)

摘要: 为探究低温下水力停留时间(HRT)对三级A/O耦合流离生化工艺脱氮的影响,选用流离球作为生物膜载体,控制温度为(10±1)℃、进水流量分配比为25:15:6、总曝气量为6 L/min、污泥龄为43 d、污泥回流比为50%,考察HRT分别为12、8、6 h时的运行效果。结果表明,HRT为8 h时脱氮效果最好,COD、NH₄⁺-N和TN平均去除率分别为84.98%、92.03%和68.52%。分析生化系统各级脱氮效果可知,HRT为6 h时,硝化反应是制约耦合工艺低温高效脱氮的关键因素;HRT为12 h时不利于提高微生物活性,TN去除率较低且去除效果不稳定。研究结果丰富了多级A/O耦合工艺低温脱氮理论,同时可为工程设计应用提供参考。

关键词: 水力停留时间; 多级A/O工艺; 低温; 脱氮; 同步硝化反硝化; 生物膜

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)17-0074-07

Effect of Hydraulic Retention Time on Multistage A/O Coupled with Flow-separated Biochemical Process for Nitrogen Removal from Wastewater at Low Temperature

WANG Fan¹, LI Jun², AI Sheng-shu¹, KANG Hua¹, NIE Ze-bing^{1,3}, BIAN De-jun^{1,3}

(1. Jilin Key Laboratory of Urban Sewage Treatment, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. Science and Technology Innovation Center for Municipal Wastewater Treatment and Water Quality Protection, Northeast Normal University, Changchun 130117, China)

Abstract: The effect of hydraulic retention time (HRT) on three-stage A/O coupled with flow-separated biochemical process for nitrogen removal at low temperature was explored. The performances of the process operated with HRT of 12 h, 8 h and 6 h were investigated respectively, and other operational conditions were as follows: flow-separated ball as the biofilm carrier, temperature of (10±1) °C, influent flow distribution ratio of 25:15:6, total aeration rate of 6 L/min, sludge retention time of 43 days and sludge reflux ratio of 50%. When HRT was 8 h, the denitrification performance was the best, and the average removal rates of COD, NH₄⁺-N and TN were 84.98%, 92.03% and 68.52%, respectively. The denitrification performances of different stage biochemical systems indicated that nitrification was the key factor restricting high-efficiency denitrification of the coupling process at low-temperature when HRT was

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(YDZJ202201ZYTS638)

通信作者: 边德军 E-mail: ccgxybiandj@163.com

6 h. HRT of 12 h was not conducive to the improvement of microbial activity, and the TN removal rate was low and unstable. The paper enriches the theory of nitrogen removal in multistage A/O coupling processes at low temperature, and can provide reference for engineering design and application.

Key words: HRT; multistage A/O process; low temperature; nitrogen removal; simultaneous nitrification and denitrification; biofilm

传统活性污泥法,即通过硝化和反硝化作用去除污水中的氮,是城市污水脱氮的主要方式,而如何实现低温污水的高效脱氮是目前困扰水处理工作者的一大难题。低温会影响脱氮功能菌群的活性,使系统脱氮效率降低^[1]。为解决这一难题,许多新技术应运而生,其中包括多级A/O耦合流离生化工艺。该工艺一方面具有多级A/O分段进水的特点,充分利用原水碳源进行反硝化,提高TN去除率^[2-4];另一方面通过投加填料提高系统的生物量,延长污泥停留时间,使低温弱势菌种(硝化菌)得到富集和繁殖^[5];同时悬浮填料生物膜产生的溶解氧浓度梯度有利于形成缺氧微环境,易于发生同步硝化反硝化(SND)反应^[6],从而提高工艺在低温条件下的脱氮效率。

水力停留时间(HRT)被认为是多级A/O工艺的重要调控参数之一^[7]。在实际工程中,若HRT较短,则处理效果不佳;若HRT较长,则会增加基建费用,造成土地、能源等的浪费^[8-9]。同时较长的HRT会使系统的负荷过低,长时间曝气导致污泥絮体裂解;HRT较短会导致硝化菌等长泥龄功能菌群过量流失,系统的处理效果低于预期^[10-12]。刘哲等^[13]在一体化处理装置脱氮除磷效果的影响研究中发现:降低HRT,提高系统内COD浓度,可促进系统反硝化反应的进行,提高脱氮效率。但较低的HRT增加了系统 NH_4^+-N 负荷,限制硝化反应的进行,影响TN的去除。在污水处理厂尾水深度处理中,HRT影响COD的去除,同时TN的去除与HRT存在一定的线性关系。例如,苑泉等^[14]研究得出:HRT对 NO_3^--N 去除率影响较小,但TN去除率随着HRT的减小而增加。

采用适当合理的HRT,对低温污水处理效率的提高和节约运行成本具有重要的意义。笔者采用三级A/O耦合流离生化工艺处理城市生活污水,控制HRT分别为12、8、6 h,通过比较3种工况下的污染物去除效果以及氮迁移转化规律,考察多级A/O

工艺在不同HRT下的污染物去除情况,以期为A/O耦合工艺的推广应用提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置采用分段进水三级A/O耦合流离球填料生物处理反应器,如图1所示。

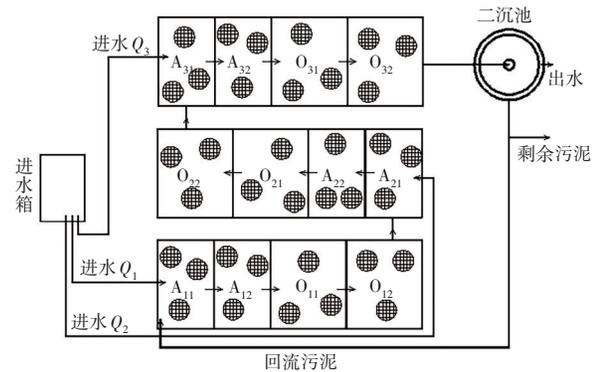


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematics of experimental setup

反应器总有效容积为126 L,每级分别设置缺氧-好氧共4个格室,各格室的缺氧区和好氧区容积比例为3:3:4:4,二沉池采用竖流式沉淀池,有效容积为54 L。采用空气压缩机对好氧区进行曝气,并用转子流量计对各级曝气量进行控制。进水和回流均采用蠕动泵进行控制,缺氧区采用电动搅拌机进行搅拌。

1.2 悬浮填料

试验选用的流离球为内部填充K3型填料(鲍尔环)以及海绵填料的组合填料。鲍尔环的材质为高密度聚乙烯,为 $\varnothing 25 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的圆柱体,密度为 0.95 g/cm^3 ,比表面积大于 $560 \text{ m}^2/\text{m}^3$,具有良好的通气性和过水性、内部不易堵塞等优点^[15]。海绵填料材质为亲水性聚氨酯,为边长30 mm的立方体,密度为 $16 \sim 17 \text{ kg/m}^3$,比表面积为 $3.8 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{m}^3$,具有孔隙率高、加快微生物高效稳定附着等优点^[16]。流离球网罩为 $\varnothing 100 \text{ mm}$ 的网状球体,材质为聚丙烯。依据低温流离球内部填充率对脱氮影响的小试研究

结果,确定填充率为30.5%。

1.3 试验水质

试验用水为模拟城市污水,采用可溶性淀粉、牛肉膏、蛋白胨、乙酸钠、氯化铵、硝酸钾、磷酸二氢钾、碳酸氢钠、氢氧化钠配制。运行期间水质参数如下:COD为185.1~269.4 mg/L、 NH_4^+-N 为10.15~19.33 mg/L、TN为21.29~36.61 mg/L、TP为2.26~5.57 mg/L、pH为6.98~7.53。

1.4 检测方法

常规指标:COD、 NH_4^+-N 、TN、TP、MLSS、MLVSS等均参照国标方法测定;pH采用pH计测定;温度及溶解氧采用溶解氧仪测定; NO_3^--N 采用离子色谱法测定。

膜生物量的测定:随机选取一个流离球填料(包括海绵和鲍尔环),将填料清洗后,烘干并称质量;烘干后填料经NaOH碱洗并利用超声波振动使生物膜脱落,再次将填料烘干并称质量,二者之差即为填料的生物量^[17]。本试验将烘干温度降低并延长烘干时间,原因是鲍尔环为高密度聚乙烯填料,长时间高温易使其变形分解。

硝化反应静态试验:测定方法参照赵宪章等^[18]研究中硝化速率的检测方法,并依据本试验的实际情况进行了调整。

1.5 试验方案

试验在低温控制室进行,控制水温为 $(10 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。进水采用3台蠕动泵控制,流量分配比为25:15:6,按比例泵入各级的首端缺氧池。填料在好氧区和缺氧区的填充率分别为13%和17%。反应器总曝气量为6 L/min,好氧区溶解氧为2~3 mg/L,缺氧区溶解氧为0.2~0.5 mg/L。污泥回流比控制为50%,剩余污泥每天由二沉池底部定量排出,控制污泥龄为43 d。试验在12、8、6 h这3种工况下运行,低温下悬浮填料生物膜上的微生物演替较活性污泥慢,因此采用有机负荷从低到高的顺序进行试验^[19]。系统启动阶段逐步增加进水量,第1~5天分别控制总进水流量为1、2、3、4和5 L/h,随后在HRT为12 h条件下培养,20 d后填料上生物膜基本形成。当COD及 NH_4^+-N 去除率达到80%时,认为系统启动成功,开始后续不同HRT条件下的对比研究。

2 结果与分析

2.1 污染物去除情况分析

2.1.1 COD去除情况

图2为各工况下COD的去除情况,其中Run1、Run2、Run3分别代表HRT为12、8、6 h的工况。3种工况下COD的平均去除率均达到85%左右,出水COD均在50 mg/L以下。这与常温条件下的研究结果不同^[20],由于为本研究为强化低温脱氮,采用了较长的污泥龄,使反应器在较小的HRT下也维持了相对较高的污泥浓度。从COD去除效果可知,低温下耦合工艺对有机物的去除效果良好且能长期保持稳定,HRT对低温污水多级A/O工艺去除有机物的影响较小。

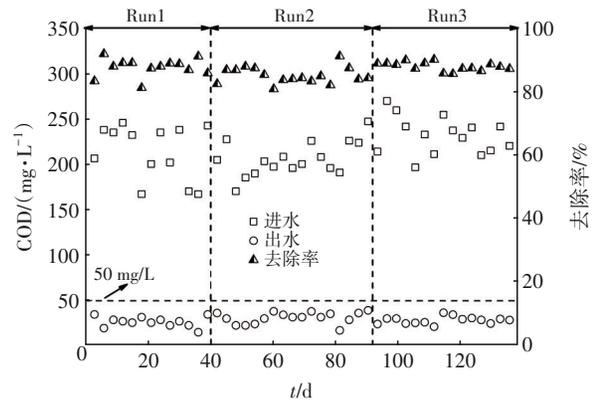


图2 各工况下COD去除效果

Fig.2 COD removal efficiency under various operating conditions

2.1.2 NH_4^+-N 去除情况

图3为各工况下 NH_4^+-N 的去除情况。

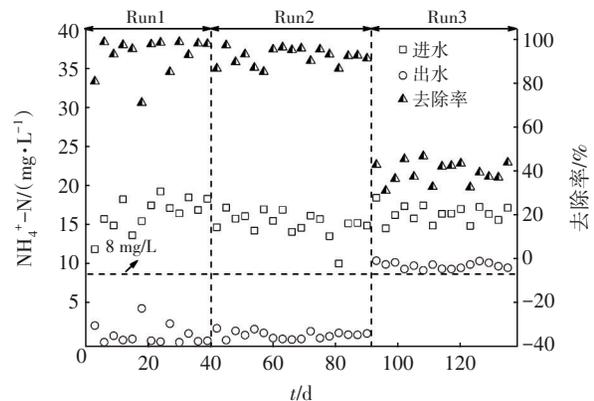


图3 各工况下 NH_4^+-N 去除效果

Fig.3 NH_4^+-N removal efficiency under various operating conditions

3种工况的 NH_4^+-N 平均去除率分别为

93.11%、92.03%、39.74%,其中Run3的去除率最低。Run1和Run2在低温下获得较高的硝化效率,这与长停留时间下硝化菌等长泥龄功能菌群的富集有关。Run3工况下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率较低,原因如下:①HRT较小使进水量增加,从而使好氧区流入过多的有机物,这对硝化反应不利^[21];②较大的进水量会对硝化菌等长泥龄功能菌群产生淘洗作用,使悬浮相中的硝化菌流失;③ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 负荷增加以及好氧区实际停留时间不足使得 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 更加难以去除^[22]。由图3可知,HRT对低温下耦合工艺去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响较大,HRT偏低会使反应器的硝化作用大幅减弱,从而使出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 难以达标。

2.1.3 TN去除情况

图4为各工况下TN的去除情况。3种工况TN的平均去除率分别为62.55%、68.52%、54.50%,去除率方差为10.18、5.02、3.59。可知由于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除的影响,导致Run3的TN去除率最低;Run1的TN去除率较Run2低,同时其去除率的方差较大,表明Run1的TN去除效果并不稳定。分析原因是Run1的HRT较长,进水量较低,长曝气时间、低污染物负荷条件下污泥活性下降,TN去除受到影响。低负荷导致的过量曝气,使得SND作用减弱,这也可能是Run1脱氮效率较差且不稳定原因之一。Run2的TN去除率最高且稳定,出水TN浓度低于15 mg/L。从图4的结果来看,低温条件下HRT对耦合工艺去除TN的影响较大,HRT偏小导致 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除不完全(如图3所示),硝化反应受限制而造成系统内生成的硝酸盐浓度较低,限制反硝化脱氮的进行。

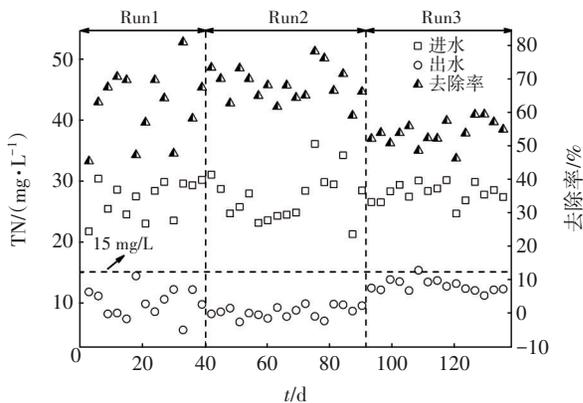


图4 各工况下TN去除效果

Fig.4 TN removal efficiency under various operating conditions

2.2 脱氮过程分析

2.2.1 沿程生物量分析

图5为各工况稳定运行时的沿程活性污泥浓度以及膜生物量。沿程活性污泥浓度呈逐渐降低的趋势[见图5(a)],同时发现随着HRT的缩短,反应器内的污泥浓度逐渐降低,各级污泥浓度之间的差异也逐渐减小。这表明随HRT的减小,耦合工艺的污泥截留能力减弱,从而对硝化菌等长泥龄功能菌群的富集能力减弱。3种工况下反应器内的平均污泥浓度分别为5 105、4 627、3 500 mg/L,低温下生物活性降低,微生物增殖缓慢,较小的HRT不利于微生物发挥作用,导致去除率偏低^[23]。在Run3工况下,反应器内平均污泥浓度的下降会使负荷增加,同时使悬浮相中的功能菌群数量减少,这些都会降低耦合工艺的低温脱氮效率。而在Run1工况下,反应器内截留了较多的污泥,过量的微生物会增加有机物的消耗,使反硝化碳源供应受到影响。

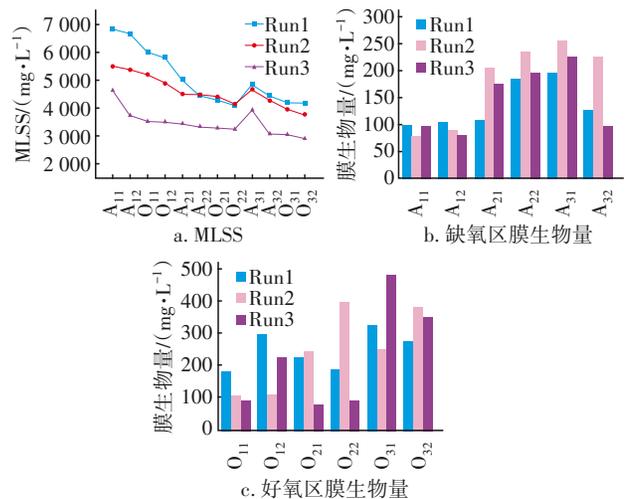


图5 各工况下污泥浓度和膜生物量的沿程变化

Fig.5 Changes of sludge concentration and biofilm biomass under various operating conditions

如图5(b)和(c)所示,各工况的膜生物量存在一定的差异,Run2工况下各缺氧区A₂₁、A₂₂、A₃₁和A₃₂中膜生物量均高于Run1和Run3,这对缺氧区的反硝化脱氮起到了一定的促进作用。3种工况下各级的膜生物量沿程逐渐增加,而活性污泥浓度逐渐降低,分析原因为系统中固着相与悬浮相微生物互为竞争关系^[24]。Run3膜生物量较低,分析原因为进水流流量增加,水流剪切作用增强致使生物膜脱落,而反应器在低温条件下运行,生物膜的更新速度较慢。同时Run3工况下系统 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率偏低,有

研究表明,较高浓度的游离氨会抑制硝化及亚硝化细菌的生长^[25],这也可能是导致 Run3 生物膜量较低的原因之一。

2.2.2 不同 HRT 下硝化及反硝化速率

为分析 HRT 对耦合工艺低温去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响,计算了各工况下每级好氧区的实际 HRT,并选取各工况格室 O_{21} 内活性污泥和流离球填料混合物进行硝化反应静态试验。图 6 为各工况格室 O_{21} 内混合物的硝化曲线,可知 Run1 和 Run2 的硝化效率优于 Run3,同时根据 Run1 和 Run2 的结果,可知在静态试验条件下完全硝化大约需要 1.33 h。Run3 各好氧区的实际 HRT 分别为 1.10、0.83 和 0.76 h,平均值小于 1 h。结合沿程生物量分析结果可知,导致 Run3 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率下降主要有两个方面的原因,一是悬浮污泥浓度降低使硝化速率下降;二是好氧区实际 HRT 偏小致使硝化反应时间不足。Run2 的好氧区 O_{21} 实际 HRT 为 1.11 h,小于试验检测的 1.33 h,但由于耦合工艺投加了生物填料,其

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率较高,可知生物膜在强化工艺硝化反应上起到了重要的作用。

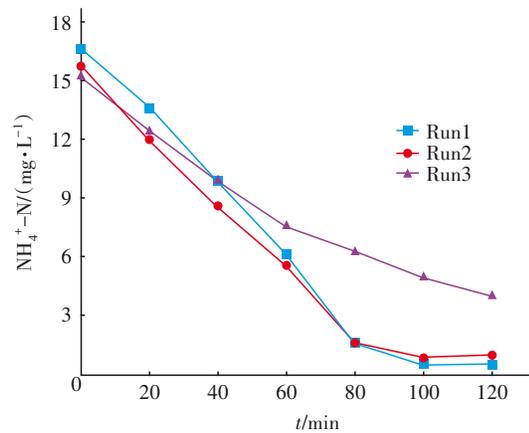


图 6 各工况下格室 O_{21} 的硝化曲线

Fig.6 Nitrification curves of chamber O_{21} under various operating conditions

2.2.3 沿程 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 分析

图 7 为各工况下 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的沿程变化及去除量。

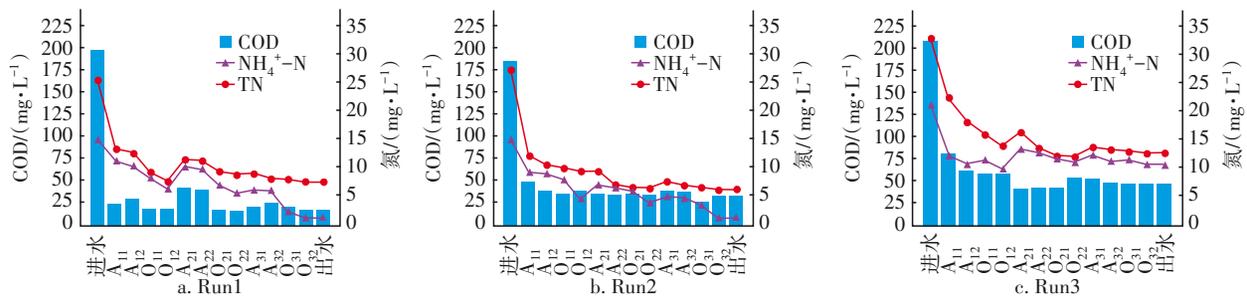


图 7 各工况下 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的沿程变化及去除量

Fig.7 COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN removal and changes under various operating conditions

Run3 沿程 COD 均较高, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的沿程变化较小,这说明 Run3 有机负荷较高,好氧区去除的有机物增加而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除量减少,且自第二级之后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 TN 相差较小,这说明进水中的 $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 在缺氧区得到充分去除,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在好氧区被硝化的量较少,最终使得 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 积累。由于 Run3 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果较差导致了 TN 的去除率偏低,与此前的分析结果一致。Run1 沿程 COD 均较低,比较 Run1、Run2 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 沿程变化,可知 Run1 的 TN 开始高于 Run2 发生在格室 A_{21} 处,同时发现由 A_{22} 到 O_{21} 处时,Run1 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 TN 的差异较 Run2 大,由此可知 Run1 第二级缺氧区的 $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 没有被完全降解,即反硝化效率较 Run2 低。另外,Run1 日处理水量较 Run2 低 50%。

3 结论

① 采用三级 A/O 耦合流离球生化工艺处理低温污水,在 HRT 为 8 h 时其脱氮效果最佳, COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 的平均去除率分别为 84.98%、92.03%、68.52%。

② HRT 对耦合工艺低温硝化影响较大, HRT 较小则硝化不完全,出水 TN 中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量偏高; HRT 较大不利于提高微生物活性,同时增加基建费用。

③ 随着 HRT 的缩短,活性污泥浓度逐渐降低,各级污泥浓度之间的差异也逐渐减小。当 HRT 为 8 h 时缺氧区的膜生物量高于 HRT 为 12 h 和 6 h,较大的生物量有利于进行反硝化脱氮。

参考文献:

- [1] 马秀兰. SBR法生物强化处理低温低C/N比污水的研究[D]. 长春:吉林大学,2010.
MA Xiulan. Biological Enhanced Treatment of Wastewater with Low C/N Ratio in the Sequencing Batch Reactor at Low Temperature [D]. Changchun: Jilin University, 2010 (in Chinese).
- [2] GE S J, PENG Y Z, QIU S, *et al.* Complete nitrogen removal from municipal wastewater via partial nitrification by appropriately alternating anoxic/aerobic conditions in a continuous plug-flow step feed process [J]. *Water Research*, 2014, 55: 95-105.
- [3] 邱慎初,丁堂堂. 分段进水的生物除磷脱氮工艺[J]. 中国给水排水,2003,19(4):32-36.
QIU Shenchu, DING Tangtang. Biological phosphorus removal and denitrification process in step water injection [J]. *China Water & Wastewater*, 2003, 19 (4): 32-36 (in Chinese).
- [4] 李思敏,张洋,唐锋兵,等. C/N值及碳源对CANON工艺污泥脱氮性能的影响[J]. 中国给水排水,2019,35(15):95-99,105.
LI Simin, ZHANG Yang, TANG Fengbing, *et al.* Effects of C/N ratio and carbon sources on sludge denitrification performance of CANON process [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35 (15): 95-99, 105 (in Chinese).
- [5] 张鹭. 西安市第五污水处理厂升级改造工艺研究及运行效果分析[D]. 西安:长安大学,2014.
ZHANG Lu. Analysis and Research on Running Effect of the Upgrading and Reconstruction in Xi'an Fifth Sewage Treatment Plant [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014 (in Chinese).
- [6] GONZALEZ B C, SPINOLA A L, LAMON A W, *et al.* The use of microsensors to study the role of the loading rate and surface velocity on the growth and the composition of nitrifying biofilms [J]. *Water Science & Technology*, 2011, 64(8): 1607-1613.
- [7] 陈杰云. 多级A/O+好氧生物膜组合工艺特性及处理污水效能研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.
CHEN Jieyun. Study on the Characteristics and Wastewater Treatment Efficiency of Multistage A/O+ Aerobic Biofilm Combined Process [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013 (in Chinese).
- [8] 赵凯亮,刘安迪,南彦斌,等. HRT对改良式A²/O—BAF反硝化除磷脱氮的影响[J]. 环境科学,2020,41(6):2771-2778.
ZHAO Kailiang, LIU Andi, NAN Yanbin, *et al.* Effect of HRT on denitrifying phosphorus and nitrogen removal in modified A²/O—BAF [J]. *Environmental Science*, 2020,41(6): 2771-2778 (in Chinese).
- [9] 林峰,张朝升,荣宏伟. HRT对Carrousel 2000氧化沟处理城市污水的影响[J]. 工业用水与废水,2008(5):29-32.
LIN Feng, ZHANG Chaosheng, RONG Hongwei. Influence of HRT on Carrousel 2000 oxidation ditch treating urban sewage [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2008(5): 29-32 (in Chinese).
- [10] 刘新超,贾磊,俞勤,等. AAO工艺在不同HRT和回流比条件下对实际污水的处理效果[J]. 环境工程,2017,35(1):51-54.
LIU Xinchao, JIA Lei, YU Qin, *et al.* Treatment effects of actual sewage by anaerobic/anoxic/aerobic process in different HRT and reflux ratio conditions [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35 (1): 51-54 (in Chinese).
- [11] 李志华,杨红亮,张云姣,等. CAST在不同HRT条件下的运行特性研究[J]. 水处理技术,2015,41(2):71-75.
LI Zhihua, YANG Hongliang, ZHANG Yunjiao, *et al.* Research on the operating characteristics of CAST process under different HRT conditions [J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41 (2): 71-75 (in Chinese).
- [12] 张雅静,王社平,王建军,等. 水力停留时间对SBR工艺脱氮除磷效果的影响分析[J]. 水处理技术,2013,39(4):59-61,65.
ZHANG Yajing, WANG Sheping, WANG Jianjun, *et al.* Effect of hydraulic retention time on nitrogen and phosphorus removal of SBR process [J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, 39 (4): 59-61, 65 (in Chinese).
- [13] 刘哲,邵小青,侯荣荣,等. HRT对一体化污水处理装置脱氮除磷效果的影响[J]. 水处理技术,2018,44(4):95-97,103.
LIU Zhe, SHAO Xiaoqing, HOU Rongrong, *et al.* Effect of HRT on nitrogen and phosphorus removal in integrated domestic sewage treatment device [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(4): 95-97, 103 (in Chinese).
- [14] 苑泉,王海燕,刘凯,等. HRT对城市污水厂尾水反硝化深度脱氮的影响[J]. 环境科学研究,2015,28(6):987-993.

- YUAN Quan, WANG Haiyan, LIU Kai, *et al.* Effects of HRT on denitrification for advanced nitrogen removal of wastewater treatment plant effluent [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(6): 987-993 (in Chinese).
- [15] 董滨,金波,何群彪,等. 关于污水处理领域悬浮填料产品的探讨[J]. *净水技术*, 2008, 27(3): 57-60, 64.
DONG Bin, JIN Bo, HE Qunbiao, *et al.* Discussion of suspended carriers used in wastewater treatment field [J]. *Water Purification Technology*, 2008, 27(3): 57-60, 64 (in Chinese).
- [16] 徐文娟,江霜英. 方形与球形聚氨酯填料用于MBBR处理混合污水的研究[J]. *水处理技术*, 2013, 39(9): 61-64.
XU Wenjuan, JIANG Shuangying. Study on cubic and round polyurethane foam carriers for mixed sewage treatment in MBBR process [J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, 39(9): 61-64 (in Chinese).
- [17] 刘媛. MBBR处理城镇污水的基础研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2007.
LIU Yuan. Study on Moving Bed Biofilm Reactor Application in Town Wastewater Treatment Plant [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007 (in Chinese).
- [18] 赵宪章,董文艺,王宏杰,等. 组合填料强化多级AO工艺处理低温污水脱氮效果[J]. *环境工程*, 2018, 36(3): 49-53.
ZHAO Xianzhang, DONG Wenyi, WANG Hongjie, *et al.* Enhancing nitrogen removal efficiency of multistage AO process with combined carrier for low temperature wastewater treatment [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(3): 49-53 (in Chinese).
- [19] 陈杰云,余薇薇,杜邦昊,等. HRT对多级A/O+悬浮填料组合工艺脱氮除磷的影响[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(9): 31-34.
CHEN Jieyun, YU Weiwei, DU Banghao, *et al.* Effect of hydraulic retention time on nitrogen and phosphorus removal in multistage A/O+suspended carrier combined process [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(9): 31-34 (in Chinese).
- [20] 尹航,何理,卢健聪,等. 水力停留时间对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响[J]. *化工学报*, 2014, 65(6): 2294-2300.
YIN Hang, HE Li, LU Jiancong, *et al.* Effect of hydraulic retention time on nitrogen and phosphorus removal by biofilm and granular coupling process [J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(6): 2294-2300 (in Chinese).
- [21] PENG Y, GE S. Enhanced nutrient removal in three types of step feeding process from municipal wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(11): 6405-6413.
- [22] 王伟,陈强,汪传新,等. 改良分段进水工艺处理低C/N城市污水流量优化控制[J]. *化工学报*, 2015, 66(7): 2686-2693.
WANG Wei, CHEN Qiang, WANG Chuanxin, *et al.* Optimization of flow for modified step feed process treating low COD/TN municipal sewage [J]. *CIESC Journal*, 2015, 66(7): 2686-2693 (in Chinese).
- [23] 白晓慧,陈英旭,王宝贞. 活性污泥法低温硝化及其运行控制条件研究[J]. *环境科学学报*, 2001, 21(5): 569-572.
BAI Xiaohui, CHEN Yingxu, WANG Baozhen. Operational parameters to keep high nitrification rate in activated sludge process under low temperature [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(5): 569-572 (in Chinese).
- [24] 明驹. MBBR—多级A/O耦合工艺处理城市生活污水实验研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2017.
MING Ju. Experimental Study on Treatment of Municipal Sewage by Combined Multi-stages A/O Process and MBBR [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017 (in Chinese).
- [25] PAVEL S, JAN B, LUKAS P, *et al.* Inhibition effect of free ammonia and free nitrous acid on nitrite-oxidising bacteria during sludge liquor treatment: influence of feeding strategy [J]. *Chemical Papers*, 2014, 68(7): 871-878.

作者简介:王帆(1989-),男,吉林长春人,博士,讲师,主要研究方向为污水生物处理及资源化。

E-mail: cgcxywf@163.com

收稿日期:2019-08-14

修回日期:2019-09-06

(编辑:沈靖怡)