

论述与研究

消除内回流液中溶解氧对反硝化过程影响的对策

郭 耀¹, 李志华¹, 李黔花¹, 王慧娟², 杨成建¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055; 2. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘 要: 内回流液中的溶解氧浓度偏高是活性污泥法中普遍存在的问题,为了简单有效地消除内回流液中溶解氧对反硝化过程的影响,针对典型的传统 A/O 工艺和多段进水 A/O 工艺,考察了有限提升进水 C/N 值、导入内源耗氧过程以及调整进水碳源组分等策略的可行性。结果表明,在传统 A/O 工艺中,有限提高进水 C/N 值对消除内回流液中的溶解氧有一定作用,但在多段进水 A/O 工艺中此消除作用受到削弱;在两种工艺中,导入内源耗氧过程均对内回流液中溶解氧有明显的消除作用,能确保缺氧段进水碳源不被溶解氧消耗,使反硝化正常进行;进水碳源组分对内回流液中溶解氧的消除有一定影响,慢速可生物降解有机物含量过高,在传统 A/O 工艺中对内回流液中溶解氧的消除不利,对 TN 的去除有负面影响,但在多段进水 A/O 工艺中,由于慢速可生物降解有机物在好氧条件下不会被完全降解,而且会跟随内回流液转移到缺氧段,这对消除内回流液中的溶解氧是有利的。

关键词: 活性污泥法; 内回流; 溶解氧; 反硝化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)01-0001-06

Countermeasures for Eliminating Influence of Dissolved Oxygen in Internal Reflux Liquid on Denitrification Process

GUO Yao¹, LI Zhi-hua¹, LI Qian-hua¹, WANG Hui-juan², YANG Cheng-jian¹

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology <Ministry of Education>, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. College of Architectural and Civil Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: The high concentration dissolved oxygen in the internal reflux liquid is a common problem in the activated sludge process. In order to eliminate the influence of dissolved oxygen in internal reflux liquid on denitrification process simply and effectively, the feasibility of strategies such as limited increase of C/N ratio of the influent, introduction of endogenous oxygen consumption process and adjustment of influent carbon source components were investigated in typical traditional A/O process and step-feeding A/O process. The limited increase of C/N ratio had a certain effect on eliminating the

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2018ZDXM-SF-025); 陕西省水利科技项目(2017slkj-10); 西安市科技计划项目(2016063SF/SF09); 国家自然科学基金资助项目(5187839)

通信作者: 李志华 E-mail: lizhihua@xauat.edu.cn

dissolved oxygen in the internal reflux liquid of the traditional A/O process, but the effect was weakened in the step-feeding A/O process. The introduction of endogenous oxygen consumption process had an obvious effect on elimination of the dissolved oxygen in the internal reflux liquid of the two processes. The strategy could ensure that the carbon source in the anoxic section was not consumed by the dissolved oxygen, so that the denitrification could proceed normally. The carbon source components in the influent had a certain effect on the elimination of dissolved oxygen in the internal reflux liquid. Excessively high content of slowly biodegradable organic matter was detrimental to the elimination of dissolved oxygen in the internal reflux liquid of the traditional A/O process and had a negative impact on the removal of TN. However, the slowly biodegradable organic matter would not be completely degraded under aerobic conditions and would be transferred to the anoxic section along with the reflux in the step-feeding A/O process, which was beneficial to eliminate dissolved oxygen in the internal reflux liquid.

Key words: activated sludge process; internal reflux; dissolved oxygen; denitrification

近年来市政污水的水质和水量特性发生了明显的变化,随着国家和地方对污水处理厂排放标准的提升,脱氮除磷成为核心,尤其是氮的去除,面临着巨大挑战^[1-2]。在脱氮过程中,溶解氧携带和跌水充氧造成的高浓度溶解氧条件以及碳源的利用成为了主要问题^[3-4]。内回流液中的溶解氧是影响缺氧池反硝化的主要因素,其会与缺氧池内的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 竞争碳源,直接影响污水处理厂的脱氮效果,对出水 TN 的稳定达标具有重要影响^[3]。虽然已有很多学者研究了不同碳源对反硝化途径和效果的影响^[5-7],但其中碳源的问题不仅仅是 C/N 值的问题,碳源的可生物降解性也需要被重视。对于内回流液中溶解氧的负面作用,多数研究中常用的方法就是外加碳源,虽然对提升反硝化能力有一定作用,但并没有实质性地解决问题。鉴于此,笔者从合理利用碳源入手,针对典型的传统 A/O 工艺和多段进水 A/O 工艺,通过有限提升进水 C/N 值、导入内源耗氧过程以及调整进水碳源组分等措施,研究消除内回流液中溶解氧对反硝化过程影响的有效对策。

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行条件

试验采用 2 个 SBR 反应器(分别记作 R1 和 R2),有效容积均为 5 L,高径比均为 2,交换比均为 25%,运行周期均为 6 h(包括 10 min 进水、120 min 缺氧搅拌、180 min 曝气、30 min 沉降、15 min 排水和 5 min 闲置),运行温度均控制在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。其中,R1 为传统 A/O 工艺,R2 为多段进水 A/O 工艺,R2 的进水根据不同比例分成 3 段,同时缺氧搅拌和曝气也被平均分为 3 段。R1 和 R2 平行运行,定期

对污泥浓度、pH 值等进行监测,使污泥浓度控制在 $(2\ 000 \pm 200)$ mg/L,污泥龄(SRT)控制在 13 d,pH 值控制在 7.0~7.5。试验过程中先后对进水位置、进水 C/N 值、进水碳源组分等条件进行调整。

1.2 接种污泥及试验用水

接种污泥取自西安市第二污水处理厂曝气池。反应器进水为模拟生活污水,采用不同有机基质(以 COD 计,①低慢速可生物降解有机物进水条件,淀粉为 175 mg/L,乙酸钠为 175 mg/L,C/N 值=6;②低慢速可生物降解有机物进水条件,淀粉为 200 mg/L,乙酸钠为 200 mg/L,C/N 值=8;③高慢速可生物降解有机物进水条件,淀粉为 400 mg/L,C/N 值=8)作为碳源,并以氯化铵(以 N 计,50 mg/L)和磷酸二氢钾(以 P 计,4.5 mg/L)分别作为氮源和磷源,同时添加微量元素(0.15 g/L 的 H_3BO_3 ,0.03 g/L 的 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$,0.18 g/L 的 KI,0.12 g/L 的 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$,0.06 g/L 的 $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,0.12 g/L 的 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,0.15 g/L 的 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,1.54 g/L 的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,12.74 g/L 的 EDTA)。

1.3 分析项目及方法

COD:快速消解分光光度法; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$:纳氏试剂分光光度法;TN:过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;污泥浓度:过滤称重法。

2 结果与讨论

2.1 有限提高进水 C/N 值的作用

提升 C/N 值的主要目的是为了保证反硝化的顺利进行,同时分段进水也是为了使碳源能被合理利用。当内回流液中的溶解氧浓度较高时,不论是外加碳源,还是分段进水分配的碳源,都会在一定程

度上被溶解氧消耗掉。在本研究中,R1 和 R2 反应器均采用低慢速可生物降解有机物进水条件,前 10 d 进水 C/N 值设置为 6,后 10 d 进水 C/N 值设置为 8,两个反应器的进、出水水质情况如图 1 所示。

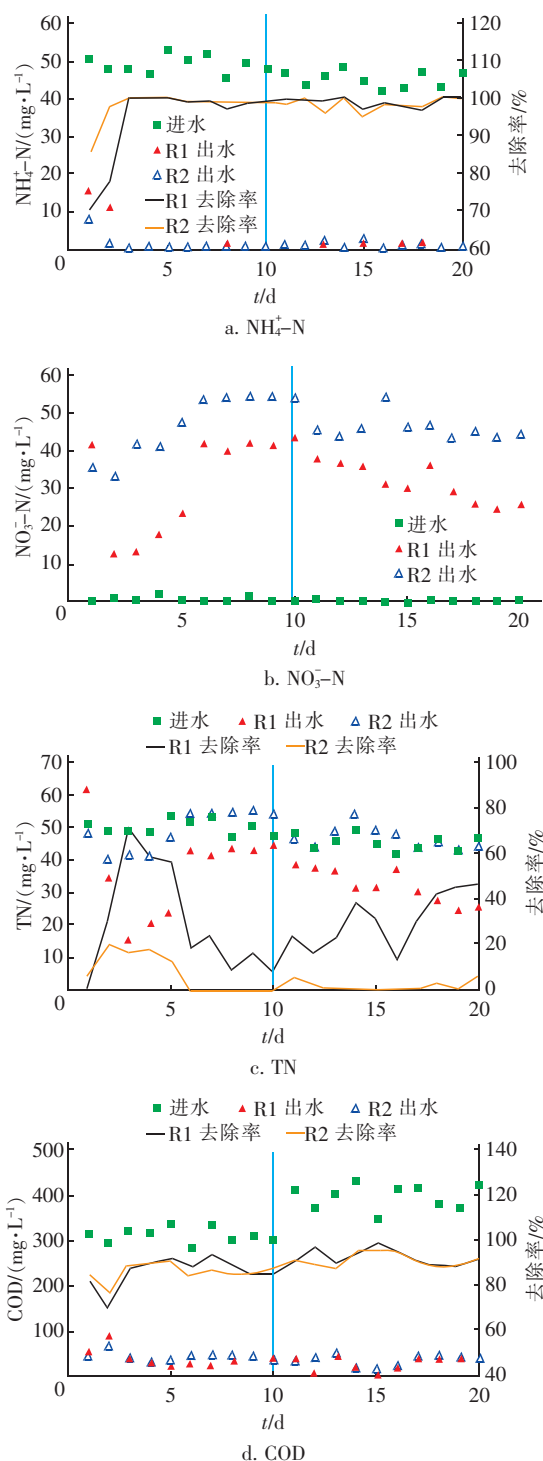


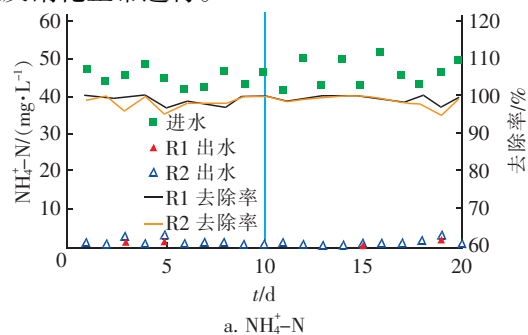
图 1 有限提高 C/N 值条件下的进、出水水质

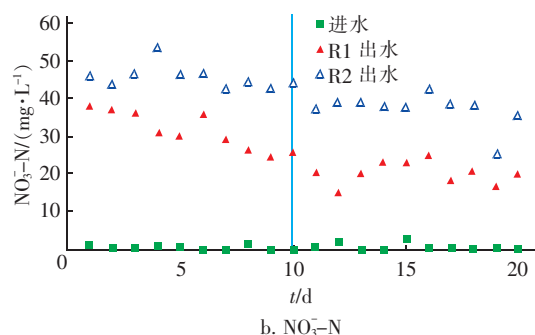
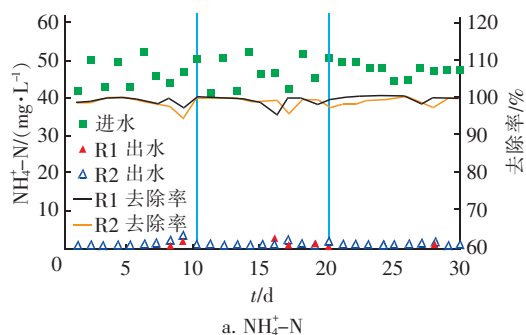
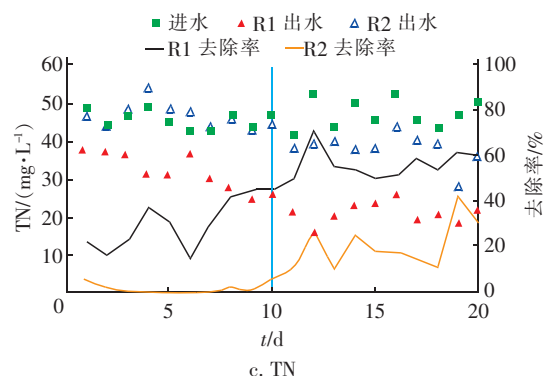
Fig. 1 Quality of influent and effluent under the condition of limited increase of influent C/N ratio

由于活性污泥需要一定的驯化过程,前期出水水质略有波动,运行到第 5 天时基本稳定。当进水 C/N 值为 6 时,R1 和 R2 均对 NH₄⁺-N 和 COD 有明显的去除效果,氨氮去除率接近 100%,COD 去除率基本稳定在 90% 左右,但对 TN 的去除效果较差,主要原因在于 NO₃⁻-N 在反硝化过程中未得到较好的去除;将进水 C/N 值提高至 8 以后,R1 和 R2 对 NH₄⁺-N 和 COD 的去除效果依然显著,对 TN 和 NO₃⁻-N 的去除效果 R1 有所提升、但是 R2 无明显变化。由此可知,有限提高进水 C/N 值对传统 A/O 工艺的反硝化过程及总氮去除效果的改善作用明显高于多段进水 A/O 工艺,而且分段进水并没有体现出明显的优势,相比之下,在多段进水 A/O 工艺中,提高进水 C/N 值的作用受到削弱,回流液溶解氧高的问题尤为突出,简单地调节或补充进水碳源对 TN 去除效果的提升作用受到限制。

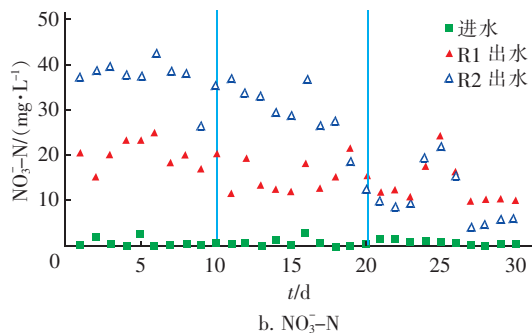
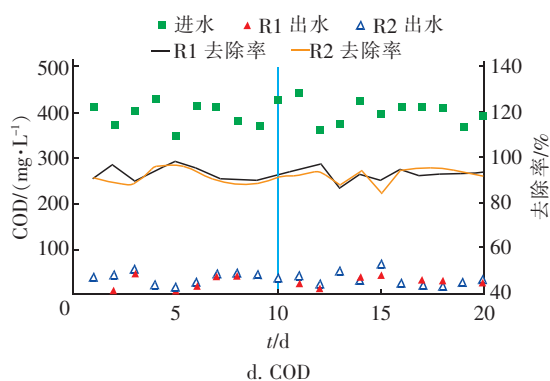
2.2 导入内源耗氧过程的作用

为了确保缺氧段的反硝化效果,将内回流液中的溶解氧通过内源呼吸过程消耗掉,可以在一定程度上避免碳源的浪费。在本研究中,在不改变 HRT 和反应器容积的情况下,通过调整进水位置(即由前端进水改为中段进水),在缺氧段前端导入内源耗氧过程,两个反应器的进、出水水质情况如图 2 所示,其中,前 10 d 为前端进水,后 10 d 为中段进水。可以看出,对于 NH₄⁺-N 和 COD 的去除,改变进水位置对两种工艺均没有明显的影响,氨氮去除率接近 100%,COD 去除率基本稳定在 90% 以上;对于 TN 的去除,在两种工艺中均表现为中段进水优于前端进水,而且传统 A/O 工艺对 TN 的去除效果明显优于多段进水 A/O 工艺。由此可知,在缺氧段前端导入内源耗氧过程,可以使得内回流液中的溶解氧被适当消耗,在进水前建立一个较好的缺氧环境,能确保缺氧段进水中的碳源不被残余的溶解氧浪费,使反硝化正常进行。

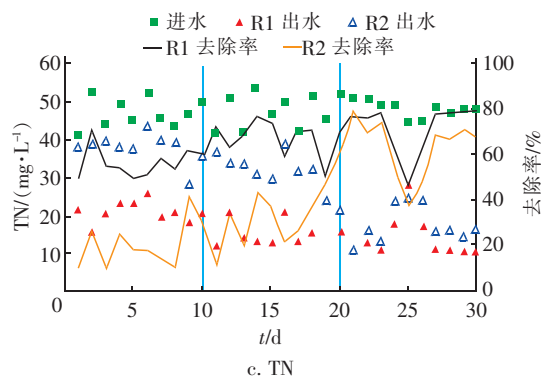


b. $\text{NO}_3\text{-N}$ a. $\text{NH}_4\text{-N}$ 

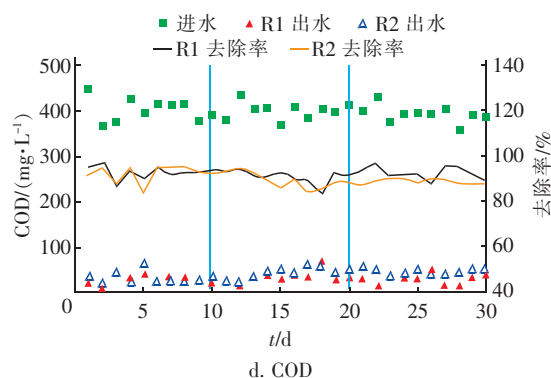
c. TN

b. $\text{NO}_3\text{-N}$ 

d. COD



c. TN



d. COD

图2 导入内源耗氧过程条件下的进、出水水质

Fig.2 Quality of influent and effluent under the condition of introducing endogenous oxygen consumption process

2.3 调整进水碳源组分的作用

进水碳源组分对反硝化过程具有重要的影响^[5-7],但是在污水处理过程中对碳源各个组分的利用不太合理。很大一部分慢速可生物降解有机物在初沉池中被去除,无法被生物反应池利用,而一部分快速可生物降解有机物被内回流液中的溶解氧消耗,使得生物池无法有效利用碳源。在本研究中,通过调整进水碳源组分,从消除内回流液中溶解氧的角度探究碳源合理利用的方法。图3为C/N值为8、低慢速可生物降解有机物进水条件下的进、出水水质,其中,3个阶段分别对应多段进水A/O工艺中的3种进水比例:7:2:1、3:4:3、4:4:2。

图3 低慢速可生物降解有机物进水条件下的进、出水水质

Fig.3 Quality of influent and effluent under the condition of low concentration slowly biodegradable organic matter influent

由图3可知,传统A/O工艺的出水水质基本稳定,且出水TN和COD浓度随运行时间有略微的下降,出水TN多数时段在20 mg/L甚至15 mg/L以下,出水COD基本稳定在40 mg/L甚至30 mg/L以下。

下。对于多段进水 A/O 工艺而言,由于进水比例发生了变化,出水水质变化明显,在 7 : 2 : 1 的进水比例条件下出水 TN 浓度最高,在 3 : 4 : 3 进水比例下次之,在 4 : 4 : 2 进水比例下最低,主要原因是出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度较高;7 : 2 : 1 进水比例条件下 COD 去除效果最好,出水 COD 基本在 30 mg/L 以下,3 : 4 : 3 进水比例条件下基本在 50 mg/L 左右浮动,4 : 4 : 2 进水比例条件下基本在 50 mg/L 以下;此外,3 : 4 : 3 和 4 : 4 : 2 进水比例条件下,出水中均检出了 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 。整体对比之下,4 : 4 : 2 进水比例条件下处理效果最优。

图 4 是 C/N 值为 8、高慢速可生物降解有机物进水条件下的进、出水水质情况,其中,3 个阶段分别对应多段进水 A/O 工艺的 3 种进水比例:7 : 2 : 1、3 : 4 : 3、4 : 4 : 2。

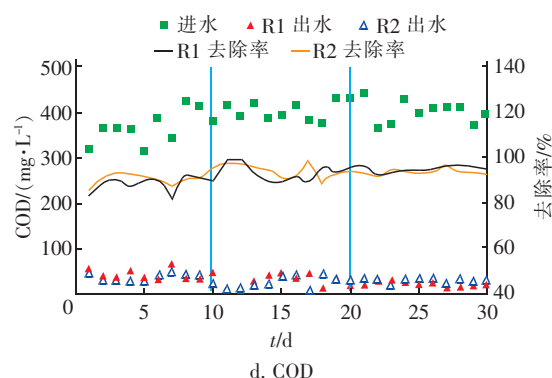
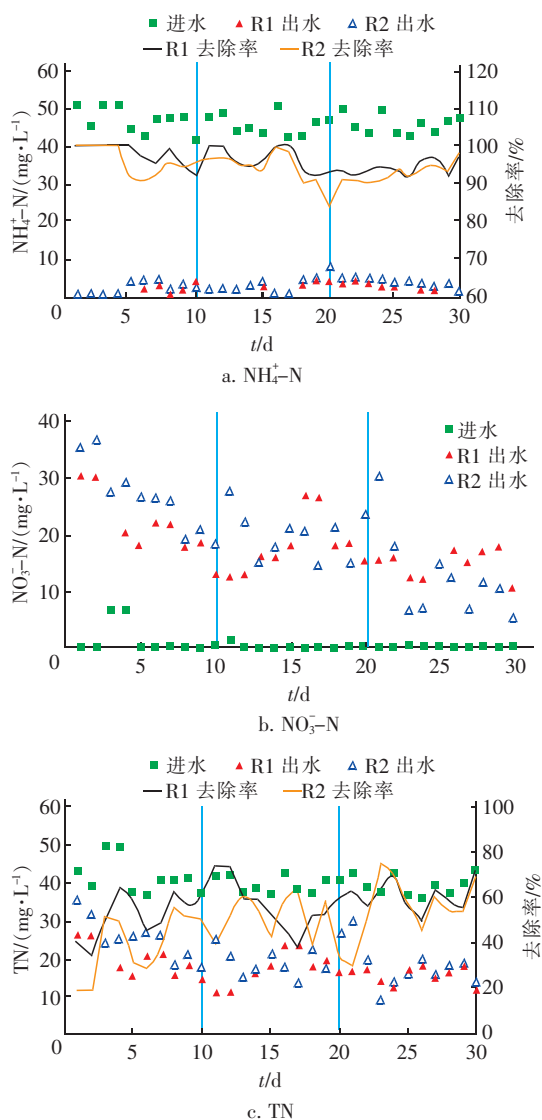


图 4 高慢速可生物降解有机物进水条件下的进、出水水质
Fig. 4 Quality of influent and effluent under the condition of high concentration slowly biodegradable organic matter influent

由图 4 可知,对于传统 A/O 工艺,与低慢速可生物降解有机物进水条件下的出水情况一致,出水水质基本稳定,且出水 TN 和 COD 浓度随着运行时间有略微的下降,但出水 TN 多数时段在 20 mg/L 左右浮动,较低慢速可生物降解有机物进水条件下脱氮效果变差,出水 COD 基本稳定在 40 mg/L 甚至 30 mg/L 以下。而对于多段进水 A/O 工艺,与低慢速可生物降解有机物进水条件下的出水情况不太一致,7 : 2 : 1 进水比例条件下的出水 TN 浓度依然最高,但与低慢速可生物降解有机物进水条件下相比有明显下降;3 : 4 : 3 和 4 : 4 : 2 相对均衡的配水条件下,处理效果相似,但仅有 4 : 4 : 2 进水比例条件下出水中检出了 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 。整体对比之下,3 : 4 : 3 进水比例条件下处理效果最优。

由此可以发现,由于快速可生物降解有机物含量与反硝化速率、反硝化潜力及总氮去除率有明显的正相关关系^[5],在低慢速可生物降解有机物进水条件下,传统 A/O 工艺和多段进水 A/O 工艺的 4 : 4 : 2 进水比例条件下有着较好的处理效果;在高慢速可生物降解有机物进水条件下,多段进水 A/O 工艺的 7 : 2 : 1 和 3 : 4 : 3 进水比例条件下 TN 去除效果有所提升,而传统 A/O 工艺和多段进水 A/O 工艺的 4 : 4 : 2 进水比例条件下 TN 去除效果却有所下降。所以,慢速可生物降解(颗粒态)有机物含量过高,在传统 A/O 工艺中对内回流液中溶解氧的消除不利,对 TN 的去除有负面影响;而在多段进水 A/O 工艺中,慢速可生物降解有机物在好氧条件下不会被完全降解,而且会跟随内回流液转移到缺氧段,这对消除内回流液中的溶解氧是有利的。

3 结论

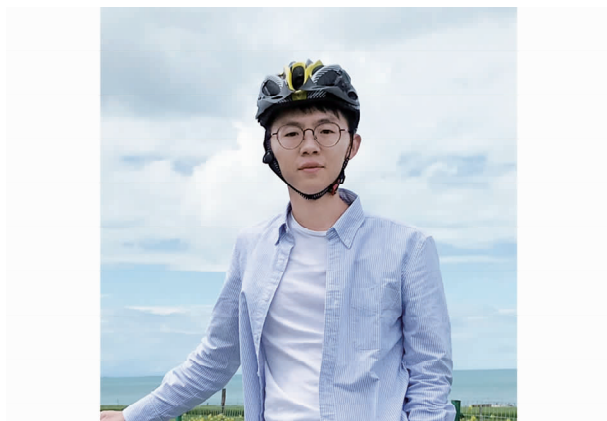
① 在传统 A/O 工艺中,有限提高进水 C/N 值对消除内回流液中的溶解氧有一定作用,可以使 TN 去除率有一定程度的提升,但此作用在多段进水 A/O 工艺中受到削弱。

② 在传统 A/O 和多段进水 A/O 工艺中,导入内源耗氧过程均可明显消除内回流液中的溶解氧,确保缺氧段进水碳源不被溶解氧消耗,使反硝化正常进行,避免进水碳源的浪费。

③ 进水碳源组分对消除内回流液中的溶解氧有一定影响,慢速可生物降解(颗粒态)有机物含量过高,在传统 A/O 工艺中对内回流液中溶解氧的消除不利,对 TN 的去除有负面影响;而在多段进水 A/O 工艺中,由于慢速可生物降解(颗粒态)有机物水解需要一定时间,使得有机物的消耗出现一定的滞后性,慢速可生物降解有机物在好氧条件下不会被完全降解,而且会跟随内回流液转移到缺氧段,这对消除内回流液中的溶解氧是有利的。

参考文献:

- [1] 陈建平,毛云飞. 传统污水处理厂类Ⅳ类水提标改造工程实践[J]. 中国给水排水,2017,33(24):87-91.
Chen Jianping, Mao Yunfei. Renovation of traditional wastewater treatment plant for the effluent quality similar to the fourth class[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(24):87-91 (in Chinese).
- [2] 王惠,王芳,白海霞. 西北某污水处理厂提标改造措施及效果[J]. 中国给水排水,2017,33(16):114-116.
Wang Hui, Wang Fang, Bai Haixia. Upgrading and reconstruction of a municipal wastewater treatment plant in northwestern China[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(16):114-116 (in Chinese).
- [3] 孙永利,李鹏峰,隋克俭,等. 内回流混合液 DO 对缺氧池脱氮的影响及控制方法[J]. 中国给水排水, 2015, 31(21):81-84.
Sun Yongli, Li Pengfeng, Sui Kejian, et al. Impact of dissolved oxygen in internal reflux mixture on nitrogen removal in anoxic tank and its control measures[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(21):81-84 (in Chinese).
- [4] 李培,潘杨. A²/O 工艺内回流中溶解氧对反硝化的影响[J]. 环境科学与技术,2012,35(1):103-106.
Li Pei, Pan Yang. Influence of DO in internal reflux of A²/O process on denitrification [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(1):103-106 (in Chinese).
- [5] 李贺,袁林江. 污水中不同 COD 组分下 A/O 脱氮工艺的反硝化效率[J]. 环境工程学报,2015,9(4):1613-1619.
Li He, Yuan Linjiang. Denitrification efficiency by changing COD fractions of wastewater in a pre-denitrification reactor [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(4):1613-1619 (in Chinese).
- [6] 刘琦. 不同碳源下反硝化过程中亚硝酸盐积累规律研究[D]. 天津:天津大学,2015.
Liu Qi. Study of Nitrite Accumulation during Denitrification with Different Carbon Sources [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015 (in Chinese).
- [7] 尹志轩,谢丽,周琪,等. 碳源性质和 COD/NO₃⁻-N 对硝酸盐还原途径的影响[J]. 工业水处理,2018,38(5):58-61.
Yin Zhixuan, Xie Li, Zhou Qi, et al. Influences of carbon source property and COD/NO₃⁻-N ratio on nitrate reduction pathway[J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(5):58-61 (in Chinese).



作者简介:郭耀(1992-),男,河南林州人,硕士研究生,研究方向为废水生物处理理论与技术。

E-mail: guoyao029@qq.com

收稿日期:2019-06-21