



改良 A²/O 工艺对低 C/N 废水脱氮除磷的应用综述

胡宝明, 李 亮, 祁 隼, 刘 峥, 刘煦晴

(武汉工程大学, 湖北武汉 430200)

[摘要] 目前我国城市污水碳氮比(C/N)普遍较低,传统 A²/O 工艺运用于低 C/N 废水处理时存在诸多问题。改良 A²/O 工艺能针对性地解决传统 A²/O 工艺在运行过程中的缺陷,改善脱氮除磷效果。基于生物脱氮除磷理论,总结了传统 A²/O 工艺运行中存在的问题,概述了几种改良工艺(倒置 A²/O、UCT、MUCT、JHB、Bardenpho)的特点及优势,并分析了分段进水、补充碳源、增设填料的运行优化方式和原理。相比于传统 A²/O 工艺,改良 A²/O 工艺的优势主要体现在:优化了混合液回流和污泥回流位置,减少了硝酸盐限制及污泥龄矛盾问题;优化了构筑物布局,缓解了碳源竞争;通过调整进水配比,提高了系统碳源利用率,降低了外加碳源成本;通过增设填料,降低了排泥对硝化速率的影响,并提高了系统抗冲击能力。最后,提出未来改良型 A²/O 工艺的研究方向:组合不同工艺以实现优势互补;研究新型液体和固体碳源,兼顾经济成本和环境效益;强化微生物培养,进一步提升系统脱氮除磷能力。

[关键词] A²/O 工艺改良;低 C/N 废水;脱氮除磷;悬浮填料;碳源

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)10-0046-07

A review of modified A²/O process application for nitrogen and phosphorus removal from low C/N wastewater

HU Baoming, LI Liang, QI Quan, LIU Zheng, LIU Xuqing

(Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430200, China)

Abstract: At present, the carbon to nitrogen ratio(C/N) of urban wastewater in China is generally low, and there exists many problems in traditional A²/O process applied in treatment of low C/N wastewater. The improved A²/O process can dissolve the defects of the traditional A²/O process in the operation process, and improve its nitrogen and phosphorus removal effect. Based on the theory of biological nitrogen and phosphorus removal, the problems in the operation of the traditional A²/O process were summarized, and the characteristics and advantages of several improved processes(inverted A²/O, UCT, MUCT, JHB, Bardenpho) were outlined. Furthermore, the operation optimization methods and principles of segmental feed, supplementary carbon source and additional filler were analyzed. Compared with the traditional A²/O process, the advantages of the modified A²/O process were mainly reflected in the following: optimizing the position of the mixed liquor return and sludge return, reducing the problem of nitrate limitation and sludge age contradiction, optimizing layout of the structure, and alleviating the competition for carbon source, adjusting feed water ratio to improve the utilization rate of the system carbon source and reduce the cost of additional carbon source, using additional filler to reduce the influence of mud discharge on the nitrification rate and improve the impact resistance of the system. Finally, future research directions for the improved A²/O process were proposed: combining different processes to achieve complementary advantages, researching new liquid and solid carbon sources to balance economic costs and environmental benefits, and enhancing microbial culture to further strengthen the system nitrogen and phosphorus removal capacity.

Key words: A²/O process improvement; low C/N wastewater; nitrogen and phosphorus removal; suspension filler; carbon source

[基金项目] 武汉工程大学研究生教育创新基金项目(CX2021355)

近年来,低碳氮比(C/N<5)废水的处置在水处理领域依旧是热点话题。低C/N污水中有机物含量不足使得反硝化菌不能将NO₃⁻-N完全去除,脱氮效果受到限制^[1-2]。传统A²/O工艺因流程简单、管理与运行费用低,被广泛应用于含氮、磷污水的处理。国务院在2015年发布的《水污染防治行动计划》中提出,对建成区水体水质达不到地表水Ⅳ类标准的城市,新建城镇污水处理设施要执行一级A排放标准^[3]。传统A²/O工艺因碳源不足、污泥龄矛盾、回流硝酸盐影响磷的释放等诸多自身局限性^[4],脱氮除磷效率难以进一步提升,无法满足新标准下氮、磷的排放要求。为强化污水处理脱氮除磷效果,需对现有工艺进行改良。

基于已发表的相关文献,笔者重点综述了A²/O工艺脱氮除磷的制约因素,研究了各改良方法在含氮、磷的低C/N废水处理中应用的有效性、局限性及未来前景,以期A²/O工艺后续发展提供指导。

1 传统A²/O工艺

1.1 传统A²/O工艺流程

传统A²/O工艺由厌氧区、缺氧区、好氧区和沉淀区4部分组成,工艺流程简单,水力停留时间短。A²/O工艺通过硝化液回流及污泥回流使微生物在3种交替环境中生长代谢,达到同步脱氮除磷的目的^[5],具体流程见图1。

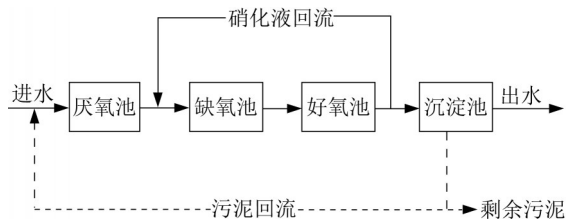


图1 A²/O工艺流程

Fig. 1 A²/O process flow

1.2 传统A²/O工艺存在的问题

A²/O工艺主要利用不同功能的微生物降解污染物,硝酸盐、污泥龄、碳源类型和内回流等因素在不同程度上影响微生物的生长活性,从而影响系统的处理效果^[6]。

1.2.1 硝酸盐限制

传统生物除磷理论认为,回流污泥中含有一定的硝酸盐,过多的硝酸盐进入厌氧池后将抑制聚磷菌(PAOs)释放磷^[7],导致PAOs在和反硝化菌竞争

有机物的过程中优势降低;PAOs不能得到足够的营养物质以满足自身的生长代谢,最终难以达到除磷的效果^[8-9]。

1.2.2 污泥龄矛盾

传统A²/O工艺属于单泥系统,聚磷菌、自养硝化菌和反硝化菌等各类微生物在同一环境中生长,各类微生物达到最大功能所需的污泥龄不同。自养硝化菌一般需要经过较长污泥龄才能发展成为优势菌群,系统在冬季达到良好硝化作用时污泥龄一般要严格地控制在30 d以上,在夏季也不能小于5 d。而聚磷菌的世代周期很短,且废水总磷去除主要是通过排放大量富磷污泥来完成的。因此,系统不能充分兼顾各种微生物的最佳泥龄,处理效果无法达到最佳^[10]。

1.2.3 碳源竞争

PAOs厌氧释磷反应、异养菌生长代谢以及反硝化脱氮过程均需要有机物作为碳源。PAOs在厌氧条件下需要吸收大量可自身利用的小分子有机物才能最大程度地释放磷;在反硝化过程中,反硝化菌在缺氧条件下需利用易降解的有机物作为碳源,将硝态氮转化为氮气。在A²/O工艺中,PAOs释磷会优先消耗大部分有机物,当进水碳源含量较低时,提供给反硝化菌的可利用有机物不足,导致系统反硝化效率降低,工艺脱氮效果降低^[11]。

1.2.4 内回流限制

在工艺操作中,生物脱氮反应需要通过内回流引入大量硝酸盐。如果回流量很大,缺氧区的溶解氧(DO)增加,反硝化菌的生长活性受到抑制,整体反硝化效率降低。由于内部回流的限制,系统反硝化能力无法最大化。

2 A²/O改良工艺

为解决传统A²/O工艺存在的诸多问题,需对其进行改良以提升处理效果。倒置A²/O、UCT、MUCT、JHB及Bardenpho这5种改进工艺不仅能有效克服传统A²/O工艺的缺陷,还能减少能源和药剂消耗,降低工程投资和运行成本^[12-14]。

2.1 倒置A²/O工艺

倒置A²/O工艺(图2)是将传统A²/O工艺的厌氧池定位在缺氧池之后,使反硝化菌能更好地利用进水中的碳源进行反硝化作用,提高碳源利用率^[15]。同时,取消内回流可节省部分能耗^[16-17]。

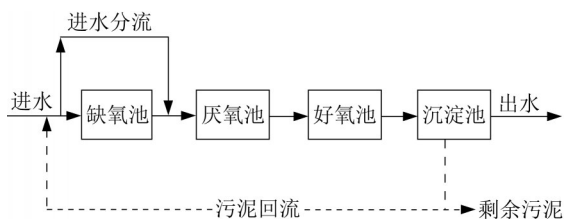


图2 倒置 A²/O 工艺流程

Fig. 2 Inverted A²/O process flow

Rong QI 等^[18]研究了传统 A²/O 工艺与倒置 A²/O 工艺对磷的释放和吸收的影响,倒置 A²/O 工艺因为取消了内循环和调换了厌氧区与缺氧区位置,可以保留更多的 PAOs 种群,表现出较好的除磷性能。曾麟峰^[19]采用倒置 A²/O 工艺处理 C/N 为 0.28 的城市污水,进水 COD、TP、NH₄⁺-N 分别为 200、70、3 mg/L,当 MLSS 为 3 000 mg/L、水力停留时间(HRT)为 12 h、污泥回流比(*R*)为 200%、污泥龄(SRT)为 6 d 时,COD、TP、NH₄⁺-N 的平均去除率分别达到 94.2%、79.6%、99.4%。Xiaolan ZENG 等^[20]采用汽提法预处理+倒置 A²/O 工艺处理城市污水与垃圾渗滤液混合污水,进水 COD、NH₄⁺-N 分别为 6 000、890 mg/L,当 MLSS 为 2 500~3 500 mg/L、HRT 为 9~12 h、*R* 为 100% 时,COD 和 NH₄⁺-N 的平均去除率分别达到 90% 和 95% 以上。

倒置 A²/O 工艺可以利用进水中的碳源缓解碳源竞争问题、提高氨氮去除效果,但因厌氧段供给的优质碳源不足,总磷的去除效果不佳。

2.2 UCT 工艺

UCT 工艺在传统 A²/O 工艺基础上,额外增加了 1 条从缺氧区至厌氧区的混合液回流,并将污泥回流位置改到缺氧池,工艺流程见图 3。这种改进方式可以有效避免由于内回流限制导致的系统脱氮能力低的问题^[21-23],有效提高缺氧池的脱氮效率^[24-25]。

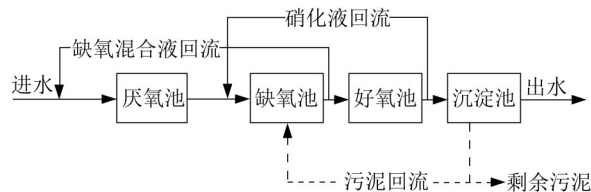


图3 UCT 工艺流程

Fig. 3 UCT process flow

E. VAIPOULOU 等^[26]采用 UCT 工艺处理生活污水,进水 COD、TKN、TP 分别为 560、86、15 mg/L,在污泥回流比(*R*)为 100%、硝化液回流(*r*)为 100%、HRT 为 9 h、SRT 为 10 d 的条件下,COD、TKN、TP 的平均去除

率分别为 89%、90%、67%。D. DI TRAPANI 等^[27]采用 UCT-MBR 联合工艺处理城市污水,进水 COD、TN、TP 分别为 325、45.7、3.8 mg/L,在 SRT 为 37 d、MLSS 为 2 000~3 000 mg/L 时,COD、TN、TP 的平均去除率分别为 92%、95%、80%。孙展鹏等^[28]采用 UCT 工艺处理低 C/N 城市污水,进水 COD、NH₄⁺-N、TP 分别为 211、88.4、12.8 mg/L,在 *R* 为 100%、*r* 为 200%、污泥沉降比(SV)在 30%~40% 的工况下,COD、NH₄⁺-N、TP 的去除率分别为 82.94%、97.84%、58.31%。

UCT 工艺在处理城市污水过程中对氨氮的去除有着较大优势,虽降低了硝酸盐的影响,但因回流过程中 DO 的限制,总磷去除率较低。

2.3 MUCT 工艺

MUCT 工艺将 UCT 工艺的缺氧区分成 2 部分,分别控制污泥回流和混合液回流,弥补了 UCT 工艺中缺氧区停留时间由于缺氧区混合液回流与硝化液回流相交而不便控制的缺陷,工艺流程见图 4。这一改进避免了回流中的 DO 对厌氧释磷的影响,表现出较好的脱氮除磷性能。

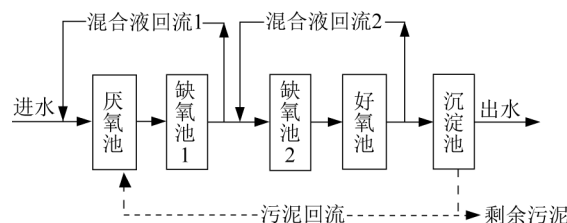


图4 MUCT 工艺流程

Fig. 4 MUCT process flow

刘华光^[29]采用 MUCT 工艺处理垃圾渗滤液与市政污水混合废水,进水 COD、NH₃-N 分别为 113、30.5 mg/L,在 HRT 为 8.3 h、SRT 为 10 d、MLSS 为 5 800~6 200 mg/L、垃圾渗滤液混合比例在 0.125% 以内时,NH₄⁺-N 和 COD 的去除率分别为 97.5%、88.1%。Wei ZENG 等^[30]采用 MUCT 工艺处理 C/N 为 2.07 的生活污水,进水 COD、NH₃-N、PO₄³⁻-P 分别为 157、79、5.39 mg/L,在 HRT 为 6.0 h、MLSS 为 3 000~4 000 mg/L、缺氧池混合液回流比(*r*₁)为 80%、好氧池混合液回流比(*r*₂)为 120%、污泥回流比(*R*)为 300% 的工况下,MUCT 工艺实现了硝化反硝化除磷,NH₃-N、PO₄³⁻-P 去除率分别为 99%、90%。

由此可见,MUCT 工艺避免了 UCT 工艺运行时内回流交叉过程中 DO 对厌氧释磷的限制,改善了对磷的去除效果。

2.4 JHB 工艺

为避免传统 A²/O 工艺中因回流引入过量硝酸盐而使系统除磷受抑制的问题,JHB 工艺前端增加了 1 个预缺氧池,一部分原水流进预缺氧池,另一部分流入厌氧池,沉淀池的一部分污泥返回预缺氧池,工艺流程见图 5。这种改进方式使污泥中的微生物可利用流入的营养物质进行反硝化,减少了污泥中硝酸盐的含量。

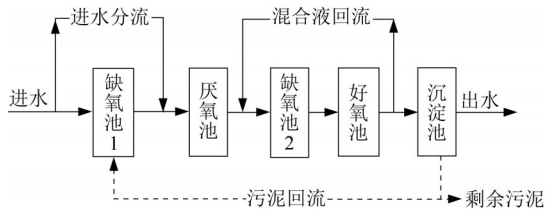


图 5 JHB 工艺流程
Fig. 5 JHB process flow

Yuanyuan SONG 等^[31]研究了 JHB-SAD(硫自养反硝化)组合工艺对低 C/N 城市污水生物脱氮除磷的影响,进水 COD、TN、TP 分别为 134、32.5、1.87 mg/L,投入 0.21%(体积分数)的垃圾渗滤液后,在 MLSS 为 2 500~2 700 mg/L、混合液回流比(*r*)为 200%、污泥回流比(*R*)为 100%、SRT 为 27~33 d 的条件下,COD、TN、TP 去除率分别达到 85.2%、92.6%、75.6%。Wei ZENG 等^[32]通过 JHB 工艺处理城市污水,进水 COD、NH₃-N、TN 分别为 168.1、71.8、72.6 mg/L,在 MLSS 为 3 500 mg/L、*r* 为 200%、*R* 为 60%、SRT 为 20 d 的工况下,NH₃-N、TN 去除率均超过 85%。

JHB 工艺通过进水分流的方式优化了碳源供给,表现出较好的脱氮性能。JHB 工艺虽降低了硝酸盐的影响,但碳源不足制约了系统的除磷能力。

2.5 Bardenpho 工艺

Bardenpho 工艺在传统 A²/O 工艺基础上增设 1 个缺氧段和 1 个好氧段,第二缺氧段利用第一好氧段产生的硝酸盐和剩余碳源进行反硝化脱氮,工艺流程见图 6。在低 C/N 废水处理过程中,Bardenpho 工艺可以有效避免硝酸盐限制的问题。

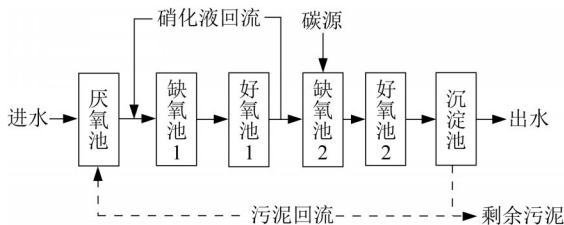


图 6 Bardenpho 工艺流程
Fig. 6 Bardenpho process flow

姚伟涛等^[33]采用 Bardenpho 工艺处理 C/N 为 1.86 的混合污水,进水 COD、TN、TP 分别为 300、70、6.5 mg/L,在 HRT 为 22.1 h、MLSS 为 4 000 mg/L、硝化液回流比(*r*)为 200%、污泥回流比(*R*)为 100% 的操作条件下,出水水质均达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。Jin LI 等^[34]采用 UASB 改进 Bardenpho 工艺处理城市垃圾渗滤液,进水 COD、NH₃-N、TN 分别为 36 828、1 805、1 933 mg/L,其中 UASB 反应器的 MLSS 为 13 200 mg/L、HRT 为 1.32 d、内回流比为 300%,Bardenpho 工艺的 MLSS 为 5 620 mg/L、HRT 为 6.0 d、*r* 为 300%、出水再循环比为 400%,处理后 COD、NH₃-N、TN 去除率分别为 97.5%、99.3%、97.7%。N. M. DEMIR 等^[35]采用 Bardenpho 工艺处理生活污水,进水 COD、TN、TP 分别为 647、79、6.5 mg/L,在 HRT 为 20.6 h、MLSS 为 4 500~5 000 mg/L、*r* 为 200%、*R* 为 400% 操作条件下,COD、TN、TP 去除率均超过 85%。

综上,Bardenpho 工艺通过 2 次反硝化过程进一步提高了系统的脱氮效率;厌氧段也能得到足够的优质碳源,达到更好的释磷效果。但 Bardenpho 工艺在处理高浓度低 C/N 废水过程中,还需要组合其他工艺强化脱氮。

表 1 总结了不同改良 A²/O 工艺的特点。

表 1 不同改良 A ² /O 工艺功能特点			
Table 1 Functional characteristics of different modified A ² /O processes			
工艺名称	克服难点	工艺不足	参考文献
倒置 A ² /O	消除了硝酸盐的干扰;提高了碳源利用率,缓解了碳源竞争;取消内回流,消除了内回流的限制	厌氧释磷阶段得不到优质碳源,总磷去除效果不佳	[15-17]
UCT	避免了内回流限制,提高了脱氮效率;降低了厌氧段硝酸盐含量,可提升低 C/N 污水除磷效率	因内回流交叉,不能完全消除回流 DO 对厌氧释磷的影响	[21-23]
MUCT	避免了内回流交叉过程中 DO 对厌氧释磷的限制,提高了除磷效果;内回流和污泥回流独立控制,可缓解污泥龄矛盾问题	操作较为复杂;需增设独立的回流系统	[29-30]
JHB	降低了回流污泥中硝酸盐含量过高的影响;充分利用内部碳源,提高了脱氮效果	总磷去除效果不佳,需要额外补充碳源	[31-32]
Bardenpho	有效避免了硝酸盐的影响;提高了内部碳源利用率	处理低 C/N 污水时,需要额外投加优质碳源以提高 TN 去除率	[35]

3 运行优化

从整体工艺上改良传统 A²/O 工艺流程可提高系统脱氮除磷效率,但受碳源不足因素限制,改良后

工艺的处理效果仍不能达到最佳,目前的研究多通过补充碳源、池体增设填料和分段进水的方式优化运行,进一步加强了对氮磷污染物的去除。

3.1 补充碳源

生物脱氮除磷过程消耗的有机物可分为系统碳源和外加碳源。由于系统碳源在污水中浓度较低,且现有工艺未充分发挥其内在价值,通常需外加碳源来提高系统的脱氮除磷效果。刘方婧^[36]采用A²/O工艺处理低C/N生活污水,在处理过程中引入了啤酒废水,当啤酒废水的投加量为70 mg/L(以COD计)时,TN和TP去除率分别达到82.39%和94.95%。孙雅雯等^[37]采用A²/O+BCO(生物接触氧化)组合工艺处理C/N为4.3左右的废水,探究丙酸钠和乙酸钠碳源对TP的去除效果,结果表明丙酸钠的效果优于乙酸钠,且PO₄³⁻-P去除率稳定在94%。黄胡林等^[38]以秸秆发酵液为外加碳源,研究其对污水反硝化脱氮的潜能,当加入稻草、玉米秸秆发酵液并维持系统C/N在6左右时,生物脱氮率分别可达到80.1%、97.3%。

3.2 增设悬浮填料

悬浮填料具有水力剪切作用,自养硝化菌可以黏附并生长在填料上,而聚磷菌和反硝化菌则以悬浮状态生长,因而系统可兼顾自养硝化菌的污泥龄,减少污泥排放对硝化速率的影响。污水处理过程中选择适当的填料和经过驯化的微生物,可以提高系统的处理效率和抗冲击能力。T. M. LAI等^[39]采用聚丙烯纤维填料改性A²/O工艺处理城市污水,研究不同操作条件下水中有机物和营养物的去除率,结果表明,悬浮填料不仅能减少水力停留时间,还可提高污染物的去除率。刘永红等^[40]在使用多级MBBR工艺处理某高校生活污水时,加入了2种新型生物填料,维持系统的COD容积负荷在1.5 kg/(m³·d)左右,运行20 d后,COD和NH₄⁺-N的去除率分别达到82.0%和97.0%。吕绛等^[41]研究了缺氧池填料填充率对A²/O+MBBR组合工艺反硝化除磷的影响,在填料填充率为10%时,反硝化除磷量占总除磷量的46.3%。

3.3 分段进水

分段进水主要应用于厌氧段和缺氧段,在处理低C/N污水时有着良好的效果。系统脱氮除磷效果的关键在于缺氧反硝化作用和厌氧释磷作用,依据原水水质合理调节厌氧段和缺氧段的进水分比例,聚磷菌和反硝化菌都能利用到优质碳源,从而缓

解碳源竞争问题,提高系统脱氮除磷能力。徐宇峰等^[42]研究了分配比对分段进水A²/O工艺脱氮除磷的影响,结果表明,当进水比(厌氧段:缺氧段)为3:6,缺氧单元除磷贡献率由5.2%升至13.0%,好氧单元除磷贡献率由94.8%降低至87.0%。南彦斌等^[43]通过两段式进水研究了改良A²/O-BAF(曝气生物滤池)工艺进水配比对反硝化除磷脱氮的影响,当进水比(预缺氧段:缺氧段)为7:3时,COD、NH₄⁺-N、TN、TP去除率分别为82.1%、92.7%、75.4%、91.2%。黄帅^[44]通过分段进水对改良A²+OSA(好氧/沉淀/厌氧)工艺除磷机制进行了研究,当系统进水比(厌氧池:缺氧池)为1:1时,COD、NH₄⁺-N、TN、TP平均去除率分别为92.7%、92.2%、90.1%、96.8%。

4 结语与展望

采用改良A²/O工艺处理低C/N废水,能针对性地解决传统A²/O工艺在运行过程中的缺陷,其优势主要体现在:(1)优化了混合液回流和污泥回流位置,减少了硝酸盐限制及污泥龄矛盾问题;(2)优化了构筑物布局,缓解了碳源竞争;(3)通过调整进水配比,提高了系统碳源利用率,降低了外加碳源成本;(4)通过增设填料,降低了排泥对硝化速率的影响,并提高了系统抗冲击能力。

尽管改良A²/O工艺能提高系统的脱氮除磷效果,但在处理低C/N废水时,碳源不足仍是主要制约因素。为进一步提高对氮磷的去除效果,还可从以下方面研究:

(1)组合适当工艺。根据进水水质的不同,适当组合不同工艺以实现优势互补,提高系统碳源利用率。

(2)研究新型碳源。引入废水类液体碳源,兼顾环境效益和经济效益;研究释放速率稳定且经济的固体缓释碳源。

(3)强化微生物培养。利用工程技术手段培养高效脱氮除磷的微生物,提升对低C/N废水的处理效果。

参考文献

- [1] SUN Shengpeng, NÀCHER C P I, MERKEY B, et al. Effective biological nitrogen removal treatment processes for domestic wastewaters with low C/N ratios: A review[J]. Environmental Engineering Science, 2010, 27(2): 111-126.
- [2] ZHANG Ting, WANG Bo, LI Xiyao, et al. Achieving partial nitrification in a continuous post-denitrification reactor treating low C/N sewage[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 335: 330-337.
- [3] GB 18918—2002 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].
GB 18918—2002 Discharge standard of pollutants for municipal

- wastewater treatment plant[S].
- [4] FAN Jie, TAO Tao, ZHANG Jing, et al. Performance evaluation of a modified anaerobic/anoxic/oxic(A²/O) process treating low strength wastewater[J]. Desalination, 2009, 249(2): 822-827.
 - [5] 易辉, 武志立. 污水脱氮除磷工艺研究[J]. 绥化学院学报, 2014, 34(8): 142-146.
YI Hui, WU Zhili. Research of the process of nitrogen and phosphorus removal from polluted water[J]. Journal of Suihua University, 2014, 34(8): 142-146.
 - [6] BAEZA J A, GABRIEL D, LAFUENTE J. Effect of internal recycle on the nitrogen removal efficiency of an anaerobic/anoxic/oxic (A²/O) wastewater treatment plant(WWTP)[J]. Process Biochemistry, 2004, 39(11): 1615-1624.
 - [7] MULKERRINS D, JORDAN C, MCMAHON S, et al. Evaluation of the parameters affecting nitrogen and phosphorus removal in anaerobic/anoxic/oxic(A/A/O) biological nutrient removal systems[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2000, 75(4): 261-268.
 - [8] 余宏刚. 污泥回流过程中缺氧处理对脱氮除磷的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
YU Honggang. Effect of anoxic treatment on nitrogen and phosphorus removal in sludge reflux process[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
 - [9] YOO H, AHN K H, LEE H J, et al. Nitrogen removal from synthetic wastewater by simultaneous nitrification and denitrification (SND) via nitrite in an intermittently-aerated reactor[J]. Water Research, 1999, 33(1): 145-154.
 - [10] 毕学军, 赵桂芹, 毕海峰. 污水生物除磷原理及其生化反应机制研究进展[J]. 青岛理工大学学报, 2006, 27(2): 9-13.
BI Xuejun, ZHAO Guiqin, BI Haifeng. Principle and progress of biochemical mechanism for biological removal of phosphorus from wastewater[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2006, 27(2): 9-13.
 - [11] 华光辉, 张波. 城市污水生物除磷脱氮工艺中的矛盾关系及对策[J]. 给水排水, 2000, 26(12): 1-4.
HUA Guanghui, ZHANG Bo. Contradiction and measures in biological N and P removal of municipal wastewater treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2000, 26(12): 1-4.
 - [12] 李奇儿. 改良型 AAO 工艺处理生活污水脱氮除磷的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
LI Qier. Modified AAO process for denitrification of domestic sewage phosphorus removal research[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
 - [13] 郝晓地, 李天宇, 吴远远, 等. A²/O 工艺用于污水处理厂升级改造的适宜性探讨[J]. 中国给水排水, 2017, 33(21): 18-24.
HAO Xiaodi, LI Tianyu, WU Yuanyuan, et al. Discussion on suitability of A²/O process for upgrading of wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(21): 18-24.
 - [14] 冯红利, 赵梦月, 丁舒喆. 城市污水厂 A²/O 工艺生物脱氮过程优化控制[J]. 中国给水排水, 2021, 37(6): 102-106.
FENG Hongli, ZHAO Mengyue, DING Shuzhe. Optimal control of biological nitrogen removal in A²/O process of WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(6): 102-106.
 - [15] 张波, 高廷耀. 倒置 A²/O 工艺的原理与特点研究[J]. 中国给水排水, 2000, 16(7): 11-15.
ZHANG Bo, GAO Tingyao. Principle and characteristics of reversed A²/O process[J]. China Water & Wastewater, 2000, 16(7): 11-15.
 - [16] 毕学军, 张波. 倒置 A²/O 工艺生物脱氮除磷原理及其生产应用[J]. 环境工程, 2006, 24(3): 29-30.
BI Xuejun, ZHANG Bo. The principle and full-scale application of reversed A²/O process for removing nitrogen and phosphorus[J]. Environmental Engineering, 2006, 24(3): 29-30.
 - [17] 李易寰, 奚蕾蕾, 钟奕杰, 等. 倒置 A²/O 工艺运行效果及优化控制方案[J]. 环境工程, 2020, 38(3): 76-81.
LI Yihuan, XI Leilei, ZHONG Yijie, et al. Operation effect and control scheme optimization of an inverted A²/O process[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(3): 76-81.
 - [18] QI Rong, YU Tao, LI Zheng, et al. Comparison of conventional and inverted A²/O processes: Phosphorus release and uptake behaviors[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(4): 571-578.
 - [19] 曾麒麟. 倒置 A²/O 工艺处理低 C/N 污水及外加碳源优化研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2016.
ZENG Qifeng. Study on low C/N wastewater treatment and external carbon source optimization by inverted A²/O process[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2016.
 - [20] ZENG Xiaolan, DING Wenchuan, ZHANG Zhi, et al. Effect of the mixing ratio during co-treatment of landfill leachate and sewage with a combined stripping and reversed A²/O process[J]. Environmental Technology, 2015, 36(20): 2668-2673.
 - [21] 王斯坦, 刘星, 刘志斌. UCT 工艺脱氮除磷效果[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(S2): 140-142.
WANG Sitan, LIU Xing, LIU Zhibin. Effect of nitrogen and phosphorus removal of UCT process[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2009, 28(S2): 140-142.
 - [22] 乔宏儒, 孙力平, 吴振华, 等. 倒置 A²/O 工艺和 UCT 工艺脱氮除磷效能比较[J]. 水处理技术, 2015, 41(12): 118-121.
QIAO Hongru, SUN Liping, WU Zhenhua, et al. The comparison of nitrogen and phosphorus removal between inverted A²/O process and UCT process[J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(12): 118-121.
 - [23] 刘万琦, 曲红, 艾胜书, 等. 污水生物脱氮除磷工艺研究[J]. 科技创新与应用, 2020(22): 47-48.
LIU Wanqi, QU Hong, AI Shengshu, et al. Study of biological nitrogen and phosphorus removal process for wastewater[J]. Technology Innovation and Application, 2020(22): 47-48.
 - [24] HAO Xiaodi, LOOSDRECHT M C M V, MEIJER S C F, et al. Model-based evaluation of two BNR processes: UCT and A₂N[J]. Water Research, 2001, 35(12): 2851-2860.
 - [25] ØSTGAARD K, CHRISTENSSON M, LIE E, et al. Anoxic biological phosphorus removal in a full-scale UCT process[J]. Water Research,

- 1997, 31(11): 2719-2726.
- [26] VAIPOULOU E, AIVASIDIS A. A modified UCT method for biological nutrient removal: Configuration and performance [J]. Chemosphere, 2008, 72(7): 1062-1068.
- [27] DI TRAPANI D, CAPODICI M, COSENZA A, et al. Evaluation of biomass activity and wastewater characterization in a UCT-MBR pilot plant by means of respirometric techniques [J]. Desalination, 2011, 269(1/2/3): 190-197.
- [28] 孙鹏展, 吴俊奇, 王真杰, 等. UCT工艺处理生活污水的实验研究 [J]. 应用化工, 2020, 49(3): 641-644.
- SUN Pengzhan, WU Junqi, WANG Zhenjie, et al. Experimental study on treatment of domestic sewage by UCT process [J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(3): 641-644.
- [29] 刘华光. 基于 MUCT 工艺的垃圾渗滤液与市政污水混合处理研究 [D]. 广州: 广州大学, 2020.
- LIU Huaguang. Study on the co-treatment of landfill leachate and municipal sewage based on MUCT process [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020.
- [30] ZENG Wei, WANG Xiangdong, LI Boxiao, et al. Nitrification and denitrifying phosphorus removal via nitrite pathway from domestic wastewater in a continuous MUCT process [J]. Bioresource Technology, 2013, 143: 187-195.
- [31] SONG Yuanyuan, LI Haibo, YI Han, et al. Landfill leachate as an additional substance in the Johannesburg-Sulfur autotrophic denitrification system in the treatment of municipal wastewater with low strength and low COD/TN ratio [J]. Bioresource Technology, 2020, 295: 122287.
- [32] ZENG Wei, BAI Xinlong, ZHANG Limin, et al. Population dynamics of nitrifying bacteria for nitrification achieved in Johannesburg (JHB) process treating municipal wastewater [J]. Bioresource Technology, 2014, 162: 30-37.
- [33] 姚伟涛, 肖社明, 张永祥. 改良 Bardenpho 工艺处理低 BOD₅/TN 混合污水工程设计 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(14): 67-70.
- YAO Weitao, XIAO Sheming, ZHANG Yongxiang. Project design of modified bardenpho process for treatment of low BOD₅/TN mixed wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(14): 67-70.
- [34] LI Jin, HE Chao, TIAN Tian, et al. UASB-modified Bardenpho process for enhancing bio-treatment efficiency of leachate from a municipal solid waste incineration plant [J]. Waste Management, 2020, 102: 97-105.
- [35] DEMIR N, YILDIRIM A, COSKUN T, et al. Carbon and nutrient removal from domestic wastewaters in a modified 5-stage Bardenpho process via fuzzy modeling approach [J]. Environment Protection Engineering, 2019, 45(1): 5-16.
- [36] 刘方婧. 啤酒废水为外加碳源对 A²/O 工艺脱氮除磷的影响 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- LIU Fangjing. Study on nitrogen and phosphorus removal in A²/O process using brewage wastewater as external carbon source [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [37] 孙雅雯, 张建华, 彭永臻, 等. 外加碳源类型对 A²/O-BCO 系统脱氮除磷性能的影响 [J]. 化工学报, 2018, 69(8): 3626-3634.
- SUN Yawen, ZHANG Jianhua, PENG Yongzhen, et al. Effect of additional carbon sources on nitrogen and phosphorus removal characteristics in A²/O-BCO process [J]. CIESC Journal, 2018, 69(8): 3626-3634.
- [38] 黄胡林, 付新梅, 周正. 秸秆发酵液作污水反硝化脱氮外加碳源的潜能研究 [J]. 工业水处理, 2019, 39(5): 42-45.
- HUANG Hulin, FU Xinmei, ZHOU Zheng. Potential study on the nitrogen removal by denitrification in wastewater by adding the anaerobic fermentation liquid of the straw as an external carbon source [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(5): 42-45.
- [39] LAI T M, DANG H V, NGUYEN D D, et al. Wastewater treatment using a modified A²O process based on fiber polypropylene media [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2011, 46(10): 1068-1074.
- [40] 刘永红, 李妙婕, 杨谨如, 等. 新型填料复合多级 MBBR 工艺脱氮及污泥减量研究 [J]. 工业水处理, 2020, 40(3): 102-106.
- LIU Yonghong, LI Miaojie, YANG Jinru, et al. Study on nitrogen removal and sludge reduction in a new type of filler composite multistage MBBR process [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(3): 102-106.
- [41] 吕峰, 周少奇. 缺氧池填料投配比对 A²/O-MBR 工艺反硝化除磷的影响 [J]. 环境工程学报, 2011, 5(3): 579-583.
- LÜ Jiang, ZHOU Shaoqi. Effect of adding ratio of carrier into anoxic tank on denitrifying phosphorus removal in A²/O-MBR process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(3): 579-583.
- [42] 徐宇峰, 王让, 唐锋兵, 等. 分配比对分段进水 A²/O 工艺脱氮除磷的影响 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2018, 52(4): 761-768.
- XU Yufeng, WANG Rang, TANG Fengbing, et al. Affection of distribution ratio of influent on nitrogen and phosphorus removal of step feed-A²/O process [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2018, 52(4): 761-768.
- [43] 南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 等. 分段进水对改良 A²/O-BAF 双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响 [J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1704-1712.
- NAN Yanbin, PENG Yongzhen, ZENG Liyun, et al. Effect of step feed on denitrifying phosphorus and nitrate removal in a modification of the two sludge A²/O-BAF system [J]. Environmental Science, 2018, 39(4): 1704-1712.
- [44] 黄帅. 改良 A²+OSA 分段进水工艺除磷机制研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2016.
- HUANG Shuai. Study on phosphorus removal mechanism of modified A²+OSA segmented influent process [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2016.
- [作者简介] 胡宝明(1996—), 硕士。电话: 13135690861, E-mail: 1796726493@qq.com。通讯作者: 刘煦晴, 副教授。E-mail: albertiliu@163.com。
- [收稿日期] 2022-06-29(修改稿)