



文章栏目：环境生物技术

DOI 10.12030/j.cjee.202011119

中图分类号 X703

文献标识码 A

郑俊田, 郑俊, 程洛闻, 等. 混合液回流比对多点进水新型 A/O/A/A/O 泥膜耦合工艺脱氮除磷的影响[J]. 环境工程学报, 2021, 15(5): 1744-1752.

ZHENG Juntian, ZHENG Jun, CHENG Luowen, et al. Influence of mixed liquid reflux ratio on a new multiple-inflow A/O/A/A/O sludge-biofilm coupling process for denitrification and phosphorus removal[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(5): 1744-1752.

混合液回流比对多点进水新型 A/O/A/A/O 泥膜耦合工艺脱氮除磷的影响

郑俊田¹, 郑俊^{1,2,3}, 程洛闻^{1,3}, 张德伟^{1,2,3,*}, 赵梦轲^{1,3}, 王梦琳¹, 张诗华¹, 丁磊¹

1. 安徽工业大学能源与环境学院, 马鞍山 243002

2. 安徽华骐环保科技股份有限公司, 马鞍山 243061

3. 安徽省曝气生物滤池 (BAF) 工程技术研究中心, 马鞍山 243061

第一作者: 郑俊田 (1996—), 男, 硕士研究生。研究方向: 水环境污染控制与治理。E-mail: zhenjuntian1121@163.com

*通信作者: 张德伟 (1988—), 男, 博士, 高级工程师。研究方向: 水环境污染控制及水体修复。E-mail: zhdewei86@163.com

摘要 针对中国南方城镇低碳氮比 (低 C/N) 生活污水的脱氮除磷问题, 开发并设计了新型多点进水 A1/O2/A3/A4/O5 泥膜耦合工艺及中试装置。在进水点 1 和进水点 2 的进水流量比为 4:6 的条件下, 通过改变混合液回流比, 研究了其对系统中有机物、氮、磷的去除影响及氮素的转化规律。结果表明: 当平均进水低 C/N 比为 2.09, 混合液回流比为 300% 时, 出水中 COD、NH₄⁺-N、TN、TP 的平均值分别为 23.45、0.80、12.41、0.36 mg·L⁻¹, 平均去除率分别为 86.88%、98.25%、77.68%、90.31%; 相对于分段进水 A/O/A/A/O 泥膜耦合工艺, 增加混合液回流比后系统对 TN 的去除率由 68.28% 增加到 77.68%; 对 TP 的去除率由 75.22% 增加到 90.31%。本系统对于低碳氮比污水处理具有明显的脱氮除磷效果优势, 解决了低碳氮比污水生物处理过程中磷出水较难低于 0.5 mg·L⁻¹ 的难题。

关键词 多点进水; 混合液回流比; A1/O2/A3/A4/O5 泥膜耦合工艺; 低碳氮比; 城镇污水; 脱氮除磷

随着水体富营养化对生态环境及人类生产和生活带来的危害越来越大, 对于氮磷排放的标准也变的日趋严格^[1]。传统 A²O 工艺具有运行方便、结构简单、工艺简洁等优势, 是城镇污水厂脱氮除磷应用最广泛的一种生物处理工艺^[2-3]。但传统 A²O 工艺属于单一活性污泥系统, 存在碳源不足、硝化细菌及聚磷菌在污泥龄上存在矛盾及硝酸盐抑制等问题, 在处理中国南方低 C/N 比城镇生活污水中极大限制了其对氮磷的高效去除^[4-6]。有研究者通过增加 A/O 反应器段数来提高系统的脱氮效果, 但这又会造成工艺更加复杂, 基建成本更高的问题^[7-8]。而仅通过硝化液回流的方式来改善系统反硝化段脱氮效果也是有限的^[9-11]。近年来, 随着氮磷排放标准的日趋严格, 研究者们发现, 多点进水配合混合液回流的生物脱氮工艺具有碳源利用率高、脱氮效果好、运行简单等优

势，逐渐受到人们的关注。项敏等^[12]通过研究回流比对分段进水A²O工艺脱氮除磷效果的影响，发现：随着混合液回流比的增加，系统对TN及TP的去除效率不断增加，但存在出水水质无法达标的缺陷。闫东等^[13]通过研究回流比对分段进水循环A/O工艺脱氮除碳效果的影响，发现：适当的回流比可以提高TN的去除效率，但无法对TP进行有效的去除。李长刚等^[14]通过研究混合液回流比对两段进水A/O工艺去除重油加工污水污染物去除的影响，发现：混合液回流比的增加可以提高系统对碳源的利用率及TN的去除率，但出水TN仍无法达标。因此，为了实现低C/N的城镇生活污水经生物处理后能够稳定达标排放，优化升级传统A²O工艺迫在眉睫。

针对中国南方城镇污水普遍具有低C/N比的特点，本研究研发了一种多点进水A1/O2/A3/A4/O5泥膜耦合工艺，通过增加混合液回流比，强化碳源利用率，以促进反硝化脱氮的进一步提高；同时，通过增加混合液回流比有利于缺氧段(A4)中反硝化聚磷菌(DPAOs)的富集，以强化脱氮除磷效果；通过向好氧段(O2/O5)投加悬浮填料强化硝化效果，以解决硝化菌与聚磷菌在SRT上的矛盾；此外，通过投加悬浮填料以促进同步硝化反硝化(SND)的发生，在有效利用碳源的基础上进一步强化脱氮效果。本文考察了不同混合液回流比对多点进水A1/O2/A3/A4/O5泥膜耦合工艺有机物去除及脱氮除磷性能的影响，以期为实现低碳氮比生活污水经生物处理后能够达标排放、强化污水脱氮除磷提供参考。

1 材料与方 法

1.1 实验装置

多点进水A1/O2/A3/A4/O5泥膜耦合工艺流程如图1所示。反应器尺寸为1.94 m×0.45 m×0.5 m，有效容积为265 L，碳钢防腐材质；反应器依次由厌氧段(A1)、好氧泥膜耦合段(O2)、厌氧段(A3)、缺氧段(A4)、好氧泥膜耦合段(O5)以及沉淀池(C)组成，体积分别为21、75、38、56、75 L；待处理污水通过多点进水方式分别进入厌氧段(A1)、厌氧段(A3)，通过内循环泵进行泥水混合营造厌氧环境，沉淀池(C)内部分污泥通过污泥回流泵回流至厌氧段(A1)，剩余污泥通过排泥泵进行外排，好氧泥膜耦合段(O5)内的硝化液回流至缺氧段(A4)，好氧泥膜耦合段(O2)、好氧泥膜耦合段(O5)内分别投加填充比为30%的MBBR悬浮填料。

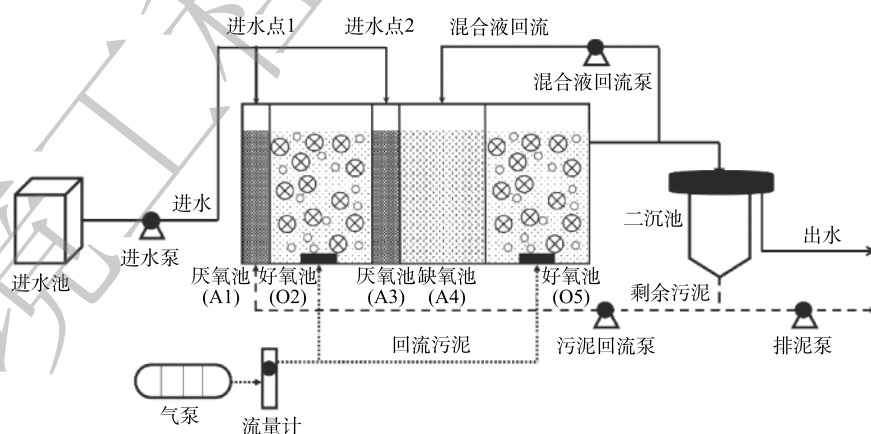


图1 多点进水新型A1/O2/A3/A4/O5泥膜耦合工艺流程

Fig. 1 Process flow diagram of a new multiple-inflow A1/O2/A3/A4/O5 sludge-biofilm coupling process

1.2 实验用水和测试方法

实验用水采用中国安徽省马鞍山市经济开发区的实际生活污水。经检测发现，该污水具有氮磷浓度含量较高、BOD₅和COD较低等特点，属于比较典型的城镇低C/N比生活污水，实际进水水质如表1所示。

表1 进水水质

Table 1 Water quality of influent

数值	pH	COD/(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	C/N
范围	7.0~7.9	148.6~199.5	100.1~126.9	36.5~49.9	41.8~54.4	1.8~3.9	1.7~3.7
均值	7.4	160.6	102.1	45.1	48.9	2.9	2.1

采用 flexiHQ30d 便携式溶解氧仪测定 DO、温度，采用 pH 计测定 pH；采用纳氏试剂比色法测定 NH₄⁺-N，采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定亚硝态氮，采用麝香草酚分光光度法测定硝态氮，用重铬酸钾法测定 COD；采用钼锑抗分光光度法测定 TP，采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定 TN，采用重量法测定 SS^[15]。

1.3 实验条件及运行工况

多点进水 A1/O2/A3/A4/O5 泥膜耦合中试装置在 18~24 °C(恒温加热棒控制)条件下运行，接种污泥取自马鞍山市南部污水处理厂的泥饼，种泥的 MLVSS/MLSS 为 0.54，污泥浓度为 36.57 g·L⁻¹ (以 MLSS 计)，污泥接种量为 2 850 mg·L⁻¹(以 MLSS 计)。当系统正常运行时，系统内 MLSS 为 2 032 mg·L⁻¹，回流污泥浓度为 6 096 mg·L⁻¹(以 MLSS 计)。通过前期对反应器 HRT 的探索，发现当 HRT 为 7 h、流量为 0.91 m³·d⁻¹ 时系统对污染物去除效果最佳。保持总进水量在 0.91 m³·d⁻¹ 运行条件下，通过调整不同的混合液回流比，开始对系统进行研究，每日取样 2 次，分别从各反应池出水口附近进行取样，测定进水、厌氧段 (A1) 末端、好氧段 (O2) 末端、厌氧段 (A3) 末端、缺氧段 (A4) 末端、好氧段 (O5) 末端、出水共计 7 个点位的不同污染物浓度。运行参数如下：总进水量 0.91 m³·d⁻¹，好氧泥膜耦合段 (O2/O5) 悬浮填料的填充比为 30%，溶解氧 (DO) 保持在 1.5~3.0 mg·L⁻¹，厌氧/厌氧/缺氧段 (A1/A3/A4)DO 控制在 0.10~0.15 mg·L⁻¹，多点进水量和回流流量通过阀门调节、流量计与人工测流量校核方式进行联动控制；通过前期试验获得进水点 1 和进水点 2 的最佳进水流量比为 4:6，污泥回流比为 50%、总 HRT 为 7 h，其中 A1、O2、A3、A4、O5 的 HRT 分别为 0.33、1.33、0.66、1.00、1.33 h，并通过式 (1) 计算 SRT 为 7.5 d。如表 2 所示，不同混合液回流比运行工况分为 5 个。

$$S = XV_T / (Q_S X_R) \quad (1)$$

式中： S 为污泥停留时间 (SRT)，d； X 为反应器中活性污泥的质量浓度，mg·L⁻¹； V_T 为反应器总体积，L； Q_S 为每天排出剩余污泥体积，L； X_R 为剩余污泥的质量浓度，mg·L⁻¹。

表2 实验条件及运行工况

Table 2 Experimental and operational conditions of the process

工况	时间/d	进水量/ (m ³ ·d ⁻¹)	温度/°C	混合液 回流比/%	平均进水负荷/(kg·(m ³ ·d) ⁻¹)			
					COD	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
1	1~10	0.91	18~24	0	0.552 1	0.151 8	0.184 3	0.011 7
2	11~20	0.91	18~24	100	0.557 9	0.162 7	0.186 8	0.012 7
3	21~30	0.91	18~24	200	0.541 4	0.162 1	0.187 4	0.013 3
4	31~40	0.91	18~24	300	0.608 9	0.165 9	0.190 2	0.012 8
5	41~50	0.91	18~24	400	0.607 8	0.165 6	0.190 8	0.012 7

2 结果与讨论

2.1 不同混合液回流比对 COD 的去除效果

由图 2 可知，当进水 COD 值在 148.57~195.33 mg·L⁻¹ 内波动时，系统中工况 1~5 对应的出水 COD 值分别为 21.95、20.82、21.69、23.45、22.95 mg·L⁻¹，COD 去除率分别为 86.41%、87.20%、86.29%、86.88%、87.10%。由此可见，混合液回流比对 COD 的去除率基本无影响，各运行工况下出水 COD 均优于国家 (GB 18918-2002) 一级 A 排放标准。综上所述，系统在不同混合液回流比测试条件下表现出稳定高效的 COD 去除能力。

由图 3 可知不同混合液回流比下 COD 的变化情况。绝大多数耗氧有机物 (以 COD 计) 在厌氧段 (A1)、厌氧段 (A3) 和缺氧段 (A4) 被消耗。通过计算得出，在各工况下，COD 在厌氧段/厌氧段/缺氧段 (A1/A3/A4) 的累计去除率占 COD 总去除率的比例分别为 78.04%、73.96%、78.50%、76.07%、74.98%，在好氧段 (O2/O5) 的累计去除率占 COD 总去除率的比例分别为 21.96%、26.04%、21.50%、23.93%、25.02%。此外，由图 3 可以看出，随着混合液回流比的增加，各工况下缺氧段 (A4) 的 COD 消耗分别为 17.09、22.41、23.16、24.47、25.37 mg·L⁻¹，缺氧段 (A4) 对 COD 消耗也不断增加。这是因为：一方面，随着回流比的增加，进入缺氧段 (A4) 的硝态氮含量也不断增加，所以反硝化菌在反硝化脱氮过程中对碳源的消耗也不断增加；另一方面，回流的混合液对缺氧段 (A4) 中 COD 具有稀释作用，所以随着混合比的增加缺氧段 (A4) 出水中 COD 也不断降低。

2.2 不同混合液回流比对氮素的去除性能

图 4 反映了不同混合液回流比对 NH₄⁺-N 去除规律的影响。由图 4 可知，虽然系统进水中 NH₄⁺-N 浓度波动较大，各工况下 NH₄⁺-N 平均进水浓度分别为 44.27、47.76、47.38、48.40、48.30 mg·L⁻¹，但出水 NH₄⁺-N 浓度却比较稳定，NH₄⁺-N 平均出水浓度分别为 0.83、0.69、0.77、0.80、1.73 mg·L⁻¹，出水 NH₄⁺-N 浓度远远小于 5 mg·L⁻¹ 的去除限值，平均去除率分别为 98.17%、98.63%、97.33%、98.25% 和 96.41%。这表明不

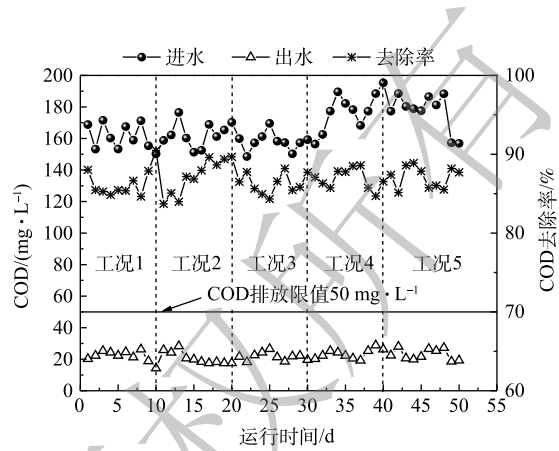


图 2 不同混合液回流比对 COD 的去除效果影响
Fig. 2 Effect of different mixture reflux ratio on COD removal

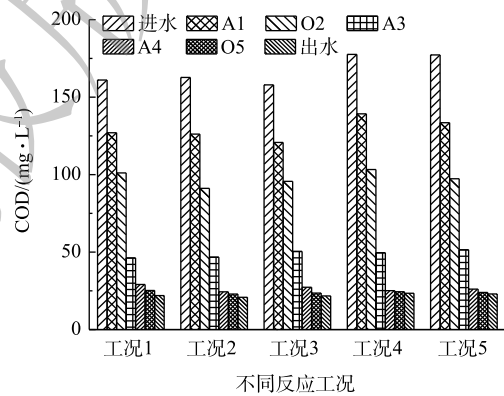


图 3 各工况下 COD 沿程的变化规律
Fig. 3 Variation rule of COD under each operating condition

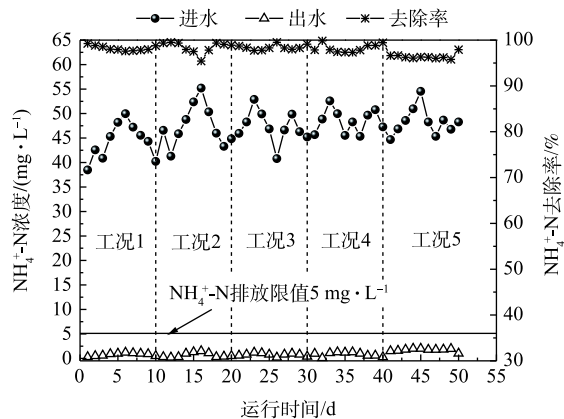


图 4 不同混合液回流比对 NH₄⁺-N 去除效果的影响
Fig. 4 Effect of different mixture reflux ratio on NH₄⁺-N removal

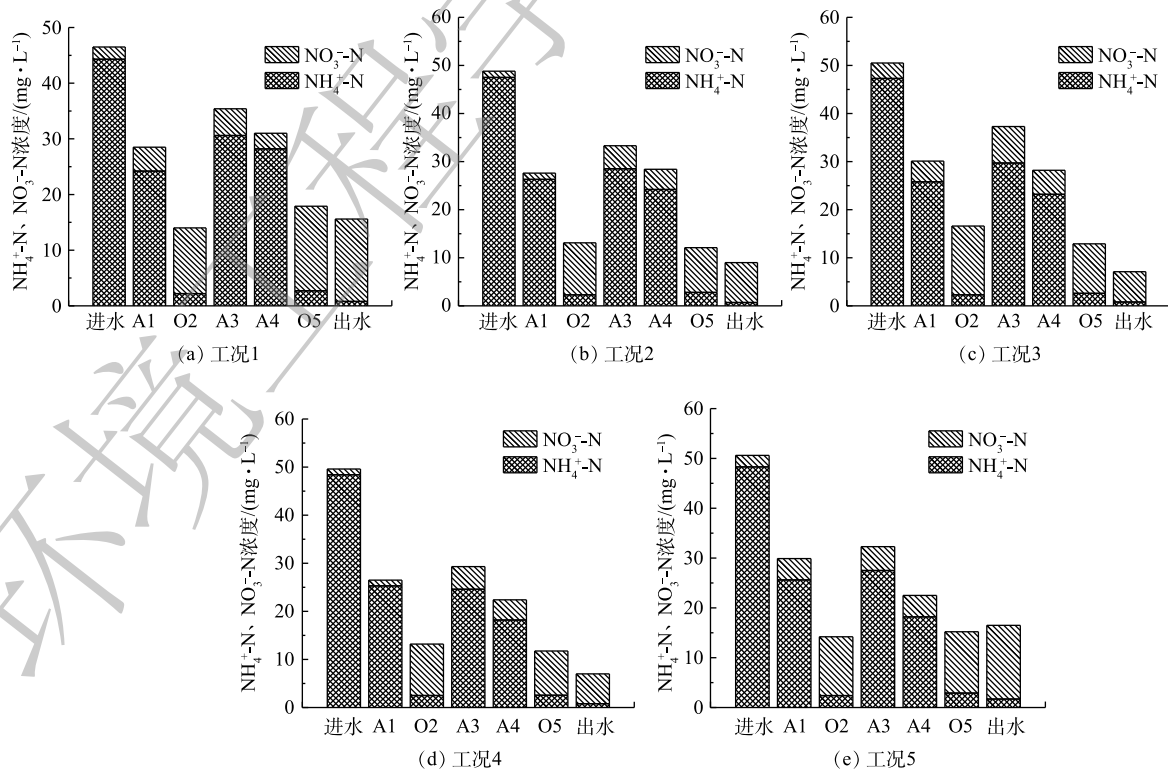
同混合液回流比对系统氨氮的去除影响较小, 系统具有很强的硝化能力, 在5个运行工况下均表现出很好的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果。表3反映了最佳运行工况下有无填料对系统脱氮的影响。由表3可以看出, 填料的投加强化了氮素的去除。在本研究中, 通过向好氧段投加高效悬浮填料, 使大量的硝化细菌能够附着在填料上, 提高了硝化效率, 有效避免了传统 A^2O 中过高的回流比对好氧段硝化的抑制作用。此外, 当混合液回流比增加到400%时, 系统对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果略有降低的原因可能是: 过高的混合液回流比导致好氧段(O5)水力停留时间降低, 造成系统硝化不完全。这与闫冬等^[13]、吴亚慧等^[16]的研究结果基本一致。

表3 有无填料对氮素的去除情况对比

Table 3 Comparison of nitrogen removal with or without fillers

条件	进水最高浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	进水最低浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水最高浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水最低浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水平均浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水平均去除率/%
有填料(氨氮)	49.8	36.59	1.15	0.15	0.83	98.32
无填料(氨氮)	48.85	37.21	6.23	4.23	4.89	91.22
有填料(总氮)	59.32	45.29	14.23	11.12	12.26	77.28
无填料(总氮)	57.23	44.12	18.33	13.25	14.78	73.22

由图5可知, 大量氨氮在好氧段O2和好氧段O5被硝化去除, 导致系统出水氨氮浓度很低。这表明好氧泥膜耦合系统具有很强的硝化能力。对于亚硝态氮在反应器各段的沿程变化规律, 由于系统运行过程中亚硝态氮含量过低, 因此在数据统计过程中省略了对亚硝态氮的研究。对于硝态氮在反应器各段的沿程变化规律, 由图5可知, 硝态氮在厌氧段(A3)和缺氧段(A4)得到有效脱除。在工况1条件下, 由于没有混合液的回流, 导致好氧段(O5)硝化产生的大量硝态氮无法通

图5 各工况下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 沿程的变化规律Fig. 5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration at different stages under different operational conditions

过反硝化去除,造成出水中含有大量 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。在工况2、3、4运行条件下,随着混合液回流比不断升高,好氧段(O5)好氧硝化产生的硝态氮通过混合液回流至缺氧段(A4),随后硝态氮通过反硝化细菌及反硝化聚磷菌进行反硝化脱氮。TP在缺氧段(A4)显著降低,这也表明缺氧段(A4)中存在反硝化聚磷菌可进行反硝化脱氮,从而导致总出水中硝态氮含量较低。随后,在工况5运行条件下,随着混合液回流比进一步升高,回流液中携带的大量溶氧破坏缺氧段(A4)的缺氧环境,从而抑制反硝化的进行;同时,过高的回流比会导致缺氧段(A4)和好氧段(O5)的HRT降低,使得系统硝化反硝化不完全,导致出水中硝态氮含量升高。

图6反映了不同混合液回流比对TN去除规律的影响。由图6可知,工况1~5中TN平均进水浓度分别为 53.75 、 54.48 、 54.65 、 55.48 、 55.65 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,进水C/N比为 $1.7\sim 3.7$ 。通过计算得出,各工况下在厌氧段/厌氧段(A1/A3/A4)的C/N消耗比分别为 3.43 、 3.27 、 3.60 、 2.43 、 4.14 ,TN平均出水浓度分别为 17.06 、 15.08 、 12.95 、 12.41 、 16.09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均去除率分别为 68.28% 、 72.34% 、 76.33% 、 77.68% 、 71.43% 。系统混合液回流比对TN的去除率具有显著的影响,在工况1~5运行条件下,随着混合液回流比的增加,TN的去除率呈现先升高后降低的趋势。这与舒敏玉等^[17]的研究结果相一致。

由图6可以看出,当混合液回流比为 $0\sim 300\%$ 时,随着回流比的增加,TN去除率不断升高,由 68.28% 增加到 77.68% ,但增加的幅度越来越小;当回流比继续增大至 400% 时,TN的出水浓度变高,去除率出现了明显的下降。其原因可能是,当混合液回流比为 $0\sim 300\%$ 时,随着回流比的增加进入缺氧段(A4)的硝态氮也不断增加,反硝化菌对碳源的有效利用率也不断增加,这一点由图3碳源的沿程变化和图7总氮的沿程变化也可以看出,所以TN的去除率不断升高。这与陈伟敏^[18]的研究结果相似。但当回流比为 300% 时,系统在厌氧段/厌氧段(A1/A3/A4)的C/N消耗比最低,TN的去除率却是最高。这是因为在工况4下存在反硝聚磷菌(DPAOs),其在缺少碳源的情况下,利用高浓度硝态氮为电子受体实现脱氮的目的,图5中工况4运行条件下缺氧段(A4)出水硝态氮显著降低及工况4条件下缺氧段(A4)出水TP显著下降也可以证实了这一点;此外,好氧池(O5)中污泥会随着混合液回流进入缺氧池(A4)。因此,回流比的增加可以增加缺氧段(A4)的污泥含量,提高缺氧段(A4)中内碳源含量,从而有利于反硝化菌利用内碳源进行反硝化脱氮。但当混合液回流比增加到 400% 时,TN的去除率出现明显的下降。这是因为,过高的回流比会因回流液中携带的大量溶氧而破坏缺氧段(A4)的缺氧环境,同时,溶氧的存在会消耗进入缺氧池(A4)中的碳源^[19-20],从而抑制反硝化的进行;此外,过高的回流比会导致缺氧段(A4)和好氧段(O5)的HRT降

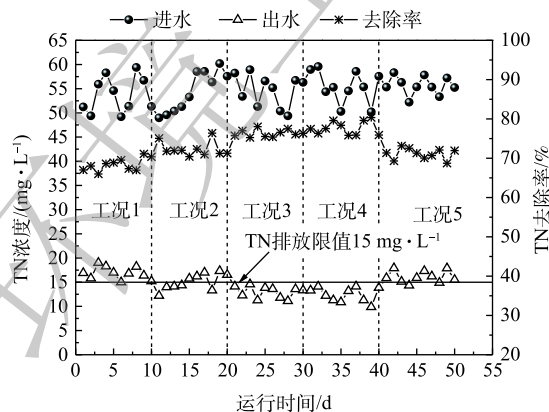


图6 不同混合液回流比对TN去除效果的影响

Fig. 6 Effect of different mixed liquid reflux ratio on TN removal

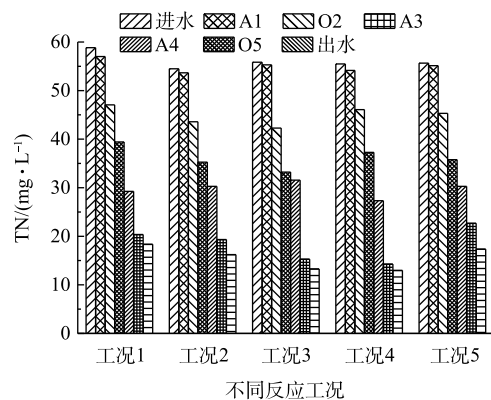


图7 各工况下TN沿程的变化规律

Fig. 7 Variation rule of TN under each operating condition

低,系统硝化反硝化不完全,故降低了系统对TN去除效果。

图7反映了不同混合液回流比下TN的沿程变化情况。由图7可知,在各工况下,TN在厌氧段/缺氧段/好氧段(A3/A4/O2/O5)都有显著降低,表明系统存在反硝化和同步硝化反硝化。通过计算得出,各工况下TN在缺氧段(A4)的去除率占TN总去除率的比例分别为25.14%、27.90%、30.64%、38.28%、19.34%。这是因为,随着混合液回流比的增加,更多的硝态氮进入缺氧池(A4)通过反硝化作用脱除,这一变化趋势与图3中COD变化趋势相一致;此外,由图7可知,TN在好氧段(O5)出现明显损失现象,各工况下TN在好氧段(O5)的去除率占TN总去除率的比例分别为15.09%、20.10%、29.14%、23.50%、13.66%,表明系统在好氧段(O5)发生同步硝化反硝化(SND),这一点从图5中氨氮及硝态氮含量在好氧池(O5)的部分损失可以证实。好氧段悬浮填料的投加为SND的发生创造反应场所,进一步强化了系统的脱氮能力,而过高的混合液回流比会造成好氧段(O5)HRT不断降低,不利于SND的发生。综上所述,当系统混合液回流比为300%时,系统通过对碳源的有效利用及DPAOs的作用可强化TN的去除效果,使TN的去除效果最佳。

2.3 不同混合液回流比对TP的去除性能

图8反映了不同混合液回流比对TP去除规律的影响,由图8可知,在工况1~5条件下,TP平均进水浓度分别为3.41、3.71、3.89、3.70、3.61 mg·L⁻¹,平均出水浓度分别为0.86、0.71、0.49、0.36、0.53 mg·L⁻¹,平均去除率分别为75.22%、81.39%、87.27%、90.31%、85.63%,TP的去除率呈现先升高后降低的趋势,系统混合液分配比对TP的去除率具有显著的影响。

由图8中可以看出,当回流比为0~300%时,随着回流比不断升高,TP的去除率不断升高;但当回流比继续增加到400%时,TP的去除率出现下降。通过计算得出,各工况下C/P消耗比值分别为54.33、47.41、40.17、45.58、48.72。

由图3可以看出,各工况下碳源的消耗情况基本相似,所以C/P消耗比值不断降低则意味着TP消耗随着回流比增加不断升高。在工况1运行条件下,C/P消耗比值很大说明TP的消耗很少,大部分消耗的碳源并没有用于除磷而是在缺氧段(A4)用于反硝化脱氮,这一点由图5和图7中缺氧段(A4)存在硝态氮和TN的同步大量损失可以看出。在工况2条件下,混合液回流比较低,进入缺氧段(A4)的硝态氮含量较低,导致反硝化除磷过程中电子受体不足,所以出水TP降低缓慢。在工况3、工况4条件下,随着混合液回流比不断增加,进入缺氧段(A4)的硝态氮不断升高,促进反硝化除磷的发生;同时,污泥会随着混合液从好氧池(O5)回流至缺氧池(A4),有利于DPAOs的形成和富集,促进系统TP的去除。当混合液回流比增加至400%时,系统TP的去除率出现下降的原因可能是:过高的回流比破坏了缺氧段(A4)的缺氧环境,抑制聚磷菌的释磷过程,从而导致聚磷菌无法在好氧段充分吸磷。这与于耀滢等^[21]的研究结果基本一致。

图9反映了不同混合液回流比下TP的沿程变化情况。由图9可以看出,TP在厌氧段(A1/A3)均有显著的升高,在好氧段/缺氧段(O2/O5/A4)均有显著的损失。通过计算得出,在工况1~5过程中,缺氧段(A4)的TP去除量占TP总去除量的比例分别为57.14%、64.09%、65.48%、69.54%、67.61%。这表明在回流比为0~300%时,随着混合液回流比的增加,缺氧段(A4)通过反硝化除磷对磷的去除量也在不断增加;但当回流比继续增加到400%时,缺氧段(A4)对磷的去除效果开始下

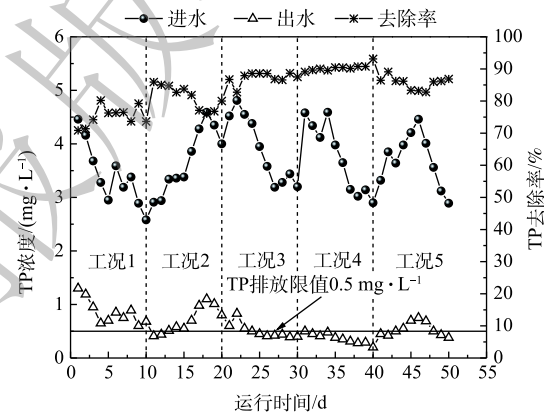


图8 不同混合液回流比对TP去除效果的影响

Fig. 8 Effect of different mixed liquid reflux ratio on TP removal

降。当回流比增加到 400% 时回流液中溶氧破坏了缺氧段 (A4) 的缺氧环境, 抑制了 DPAOs 的正常代谢; 此外, 过高的回流比会导致缺氧段/好氧段 (A4/O5) 的 HRT 降低, 造成反硝化除磷及好氧吸磷过程不完全。综上所述, 在混合液回流比为 300% 时, 系统对 TP 的去除效果最佳, 过高或过低的回流比均会影响系统的除磷效果。

3 结论

1) 采用 A/O/A/A/O 泥膜耦合脱氮除磷工艺, 以平均进水 C/N 比为 2.09 的废水为研究对象, 在进水分配比为 4:6、SRT 为 7.5 d、污泥回流比为 50%、混合液回流比为 300% 的条件下, 出水中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 的平均值分别为 23.45、0.80、12.41、0.36 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均可稳定达到一级 A 标准。

2) 在混合液回流比由 0 增加到 400% 的过程中, 混合液回流比对 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果的影响不大, 系统对 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均有很高的去除率, 表明系统具有较好的有机物去除能力和很强的硝化能力。

3) 混合液回流比对 TN 和 TP 的去除效果具有显著的影响。当回流比在 0~300% 时, 在反硝化菌和聚磷菌的共同作用下, TN 和 TP 的去除效果随回流比的增加而升高; 在增加混合液回流后, TN 的去除率由 68.28% 升高到 77.68%, TP 的去除率由 75.22% 升高到 90.31%; 但当回流比继续增加到 400% 时, TN 和 TP 的去除率开始下降, 这说明混合液回流比并非越高越好。

4) 该工艺在处理低 C/N 生活污水的过程中对污染物具有很好的处理效果。该工艺通过 DPAOs 的作用, 强化了系统脱氮除磷的能力, 解决了出水磷含量难以低于 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的难题; 通过好氧段悬浮填料的投加克服了硝化菌及聚磷菌在 SRT 上的矛盾, 促进 SND 的发生, 强化系统对于碳源的利用。该结果对传统污水处理厂的提标改造具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] ZHANG W, JIN X, LIU D, et al. Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment for a typical arid river-Fuyang River in northern China[J]. *Journal of Environmental Science*, 2017, 55(5): 41-48.
- [2] ABYAR H, YOUNESI H, BAHRAMIFAR N, et al. Biological CNP removal from meat-processing wastewater in an innovative high rate up-flow A²O bioreactor[J]. *Chemosphere*, 2018, 213(12): 197-204.
- [3] JI B, ZHANG X, ZHANG S, et al. Insights into the bacterial species and communities of a full-scale anaerobic/anoxic/oxic wastewater treatment plant by using third-generation sequencing[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2019, 128(6): 744-750.
- [4] NATALIA R M, BADIA F M, GUIASOLA A, et al. Glutamate as sole carbon source for enhanced biological phosphorus removal[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 657(1): 1398-1408.
- [5] 李亚峰, 杨嗣靖, 于耀滢. 基于倒置 A²/O 工艺脱氮除磷存在问题的优化措施[J]. *工业水处理*, 2019, 39(8): 15-18.
- [6] 马吴俊, 孙冬青, 纪荣平. 3段进水 A/O 工艺处理生活污水实验研究[J]. *水处理技术*, 2013, 39(8): 71-74.
- [7] BOYLE C A, MCKENZIE C J, MORGAN S. Internal recycle to improve denitrification in a step feed anoxic/aerobic activated sludge system[J]. *Water Science & Technology*, 2009, 60(7): 1661-1668.
- [8] 刘胜军, 杨学, 石凤, 等. 多段多级 AO 除磷脱氮工艺分析与研究[J]. *给水排水*, 2012, S1(1): 191-194.

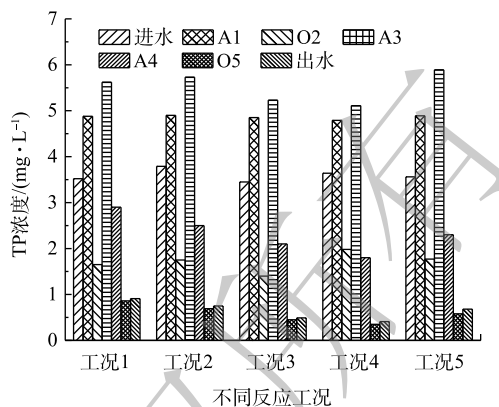


图9 各工况下 TP 沿程变化规律

Fig. 9 Variation rule of TP under each operating condition

- [9] 姚学文, 罗斌, 邱家国, 等. 混合液回流比和外碳源对反硝化脱氮效能的影响[J]. 中国给水排水, 2019, 35(9): 58-62.
- [10] 刘壮, 杨培, 史彦伟, 等. 回流比对AAO中试脱氮除磷效果的影响研究[C]//中国城市科学研究会, 中国城镇供水排水协会, 海南省住房和城乡建设厅, 等. 第十二届中国城镇水务发展国际研讨会与新技术设备博览会论文集, 2017: 6.
- [11] 马骏, 查晓, 吕锡武. 硝化液回流比对缺氧-生物转盘工艺脱氮效果的影响[J]. 净水技术, 2018, 187(1): 59-63.
- [12] 项敏, 陈东辉, 黄满红. 回流比对分段进水A²/O工艺脱氮除磷影响的小试研究[J]. 广州化工, 2011, 39(12): 127-130.
- [13] 闫冬, 何争光, 韩艳萍, 等. 内回流比对分段进水循环A/O工艺系统性能的影响研究[J]. 工业水处理, 2015, 35(6): 27-30.
- [14] 李长刚, 阎光绪, 郭绍辉. 内循环回流比和碳源投加量对两段进水A/O工艺去除重油加工污水氮污染物的影响[J]. 石油科学通报, 2018, 3(4): 113-120.
- [15] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater[M]. Washington: American Public Health Association, 1998.
- [16] 吴亚慧, 陆少鸣, 胡勇, 等. 一体化生物滤池处理农村污水硝化液回流比影响[J]. 水处理技术, 2019, 45(4): 93-95.
- [17] 舒敏玉, 陈俊鸿, 刘涛, 等. 硝化液回流比对MBBR一体化设备脱氮除磷的影响研究[J]. 广东化工, 2018, 45(17): 63-65.
- [18] 陈伟敏. 硝化液回流比对印染废水总氮去除率影响的研究[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(6): 25-27.
- [19] 郭耀, 李志华, 李黔花, 等. 消除内回流液中溶解氧对反硝化过程影响的对策[J]. 中国给水排水, 2020, 36(1): 1-6.
- [20] 郑俊, 贺倩倩, 张德伟, 等. 硝化液循环比对DBF-BAF工艺处理焦化废水效能的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 317-321.
- [21] 于耀滢, 范维利, 郭鑫. 硝化液回流比对改良型倒置A²/O系统脱氮除磷性能研究[J]. 建筑与预算, 2020(2): 47-50.

(责任编辑: 曲娜)

Influence of mixed liquid reflux ratio on a new multiple-inflow A/O/A/A/O sludge-biofilm coupling process for denitrification and phosphorus removal

ZHENG Juntian¹, ZHENG Jun^{1,2,3}, CHENG Luowen^{1,3}, ZHANG Dewei^{1,2,3,*}, ZHAO Mengke^{1,3}, WANG Menglin¹, ZHANG Shihua¹, DING Lei¹

1. School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China

2. Anhui Huaqi Environmental Protection Technology Co. Ltd., Ma'anshan 243061, China

3. BAF Engineering Technology Research Center of Anhui Province, Ma'anshan 243061, China

*Corresponding author, E-mail: zhdewei86@163.com

Abstract A new multiple-inflow A1/O2/A3/A4/O5 sludge-biofilm coupling process and its pilot facility were developed and designed for the denitrification and phosphorus removal from domestic sewage with low C/N ratio in the towns of South China. At the inlet flow ratio of 4: 6 between inlet point 1 and inlet point 2, the influence of the mixed liquid reflux ratio on the removal of organic matter, nitrogen and phosphorus in the system and the rule of nitrogen transformation were studied. The results showed that when the average C/N ratio was 2.09 and the mixed reflux ratio was 300%, the average values of COD, NH₄⁺-N, TN and TP in the effluent were 23.45, 0.80, 12.41 and 0.36 mg·L⁻¹, respectively, and the corresponding average removal rates were 86.88%, 98.25%, 77.68% and 90.31%, respectively. Compared with multi-stage inflow A/O/A/A/O sludge-biofilm coupling process, the TN removal rate of the system increased from 68.28% to 77.68% and the TP removal rate increased from 75.22% to 90.31% after the mixed liquid reflux increased. This system has significant advantages in denitrification and phosphorus removal from low carbon nitrogen ratio sewage, and solves the problem that the phosphorus effluent is difficult to be below 0.5 mg/L in the biological treatment of low carbon and nitrogen ratio sewage.

Keywords multi-point water inlet; mixed liquid reflux ratio; A1/O2/A3/A4/O5 sludge-biofilm coupling process; low C/N ratio; urban sewage; denitrification and phosphorus removal