

周期循环式活性污泥法工艺优化提升低碳氮比城镇污水脱氮效能研究

庞维海^{1,2}, 李惠平², 张琨³, 王曦⁴, 谢丽^{1,2}

(1. 同济大学长江水环境教育部重点实验室, 上海200092; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海200092;
3. 广东粤海水务股份有限公司, 深圳518021; 4. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海200092)

摘要: 碳氮比(C/N)是制约污水净化过程脱氮效率的重要因素之一。以周期循环式活性污泥法(CASS)工艺为基础, 分别考察了排水比、曝气时间以及进水模式对C/N=1.8的低碳源生活污水脱氮效果的影响。研究表明, 在低C/N值进水下, 排水比是影响CASS脱氮效果的最主要因素。当排水比分别为30%、40%和50%时, CASS工艺出水的TN平均质量浓度分别为17.8 mg·L⁻¹、9.5 mg·L⁻¹和6.6 mg·L⁻¹, TN去除效果随排水比增加而显著提升; 因此, 对于CASS工艺而言, 排水比宜根据C/N进行适当调整, 而不应该统一设置成30%。

关键词: 低碳氮比; 周期循环式活性污泥法; 工艺优化; 碳源分配

中图分类号: X524

文献标志码: A

Cyclic Activated Sludge System-based Process Optimization to Improve Denitrification Efficiency of Low C/N Municipal Wastewater

PANG Weihai^{1,2}, LI Huiping², ZHANG Kun³, WANG Xi⁴, XIE Li^{1,2}

(1. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. GUANGDONG GDH Water Co., Ltd., Shenzhen 518021, China; 4. Tongji Architectural Design(Group) Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Carbon-to-nitrogen ratio (C/N) is one of the most important factors affecting aerobic denitrification effect. Based on the cyclic activated sludge system (CASS) process with low-carbon (C/N=1.8) influent, the

effects of drainage ratio, aeration time, and water intake mode on denitrification effect are investigated separately. The results show that limited by the influent carbon source concentration, the drainage ratio is the main factor affecting the nitrogen removal efficiency. The average total nitrogen (TN) concentration of CASS effluent was 17.8 mg·L⁻¹, 9.5 mg·L⁻¹ and 6.6 mg·L⁻¹ when the drainage ratio was 30%, 40% and 50%, respectively; Therefore, for CASS process, the drainage ratio should be adjusted appropriately according to the carbon nitrogen ratio instead of being set to 30%.

Key words: low carbon to nitrogen ratio; cyclic activated sludge system (CASS); process optimization; carbon source allocation

目前我国城镇生活污水普遍存在碳氮比(C/N)较低的问题, 由此使得污水处理难以实现高效脱氮除磷^[1]。对于低C/N污水处理的主要应对方法有: ①投加外加碳源提高C/N^[2]。②采用污泥厌氧发酵及水解酸化等技术实现碳源富集分离并作为补充碳源^[3]。③改变处理工艺运行时序, 优化碳源配置^[4]。其中方法①和②虽能有效提高污水碳源浓度, 但是也额外增加了污水厂建设与运营投资成本^[5-6]。而方法③是通过优化工艺控制参数, 将污水中碳源优化分配至不同处理阶段, 充分利用原污水中碳源, 兼具经济性与高效性。

周期循环式活性污泥法(cyclic activated sludge system, CASS)是一种以传统SBR工艺为基础的变形工艺, 此工艺集好氧曝气、厌氧反应、沉淀和排水

收稿日期: 2021-07-06

基金项目: 广东省应用型科技研发及重大科技成果转化专项(2017B020236004)

第一作者: 庞维海(1976—), 男, 工学博士, 助理教授, 主要研究方向为城镇污水处理与资源化利用。

E-mail: pangweihai@tongji.edu.cn

通信作者: 谢丽(1976—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为污水生物处理理论与技术。

E-mail: sally.xieli@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

于一体,在控制时序上具有灵活多变、易于调控的优点。因此通过方法③对该工艺的控制参数进行优化,以充分利用原污水碳源、提高反硝化脱氮效果。针对间歇式反应器的优化参数主要有排水比、曝气时间和分段进水方式。适当增大CASS工艺排水比,可减缓反应器前一周期对后一周期进水的稀释作用,从而相对增加反应器内碳源浓度;缩短曝气时间则可增加反硝化反应时长;分时段进水方式与A²O工艺通过原水碳源分流的方式类似,充分利用原有碳源进行反硝化脱氮^[7]。王加蒙等^[8]采用SBR工艺对平均C/N为2.9的生活污水进行处理发现,适当增加排水比可增加下一周期反应器内的碳源浓度,从而提高脱氮效果。郭建华等^[9]探究了采用多段进水方式下SBR工艺深度脱氮效果,证明了分时段进水可有效提升脱氮效果,但对不同C/N的污水适用的进水方式也不相同。此外,也有研究发现,通过控制曝气系统实现短时曝气,或是采用厌氧-限氧的方式也可显著提升脱氮效果^[10-11]。上述相关研究所处理的污水C/N值主要集中在2~5范围内,但我国南方某些城市生活污水C/N低于2,针对此类低

C/N比生活污水,更需要充分利用碳源来提升脱氮效果。因此本研究通过改变排水比例、曝气时长和分时段进水的方式,探究了CASS工艺对广东省某污水厂C/N小于2的生活污水的优化处理方式,以期提高低碳源污水的脱氮效果。

1 实验部分

1.1 原水水质

实验进水取自广东省某城镇污水厂进水井,具体指标及平均值如表1所示。污水厂所在地区为合流制管网系统,水样数量为93份,涵盖早中晚各时段,原污水COD、NH₄⁺-N和TN平均质量浓度分别为79.4 mg·L⁻¹、23.5 mg·L⁻¹和45.7 mg·L⁻¹。一般认为当生物化学需氧量(BOD)与总氮(TN)比值>2.86才能实现硝酸盐的反硝化作用,而当污水BOD/TN>4时碳源充足^[12-13]。表1中污水化学需氧量(COD)与总氮(TN)比值和BOD/TN值分别仅为1.8和0.6,此值远低于我国常规城镇污水处理厂C/N,碳源不足会严重影响污水脱氮效果^[14]。

表1 污水水质参数

Tab.1 Sewage water quality parameters

水质指标	COD/(mg·L ⁻¹)	BOD/(mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	COD/TN	BOD/TN
平均值±标准差	79.4±12.1	25.5±0.6	23.5±8.3	45.7±6.3	1.8±0.4	0.6±0.1

注:样本量=93

1.2 实验装置与分析方法

本实验中,CASS工艺中试装置处理规模为40t·d⁻¹。CASS工艺的实验运行方式有8种:首先,将排水比分别设置为30%、40%和50%,考察排水比对脱氮效果影响;其次,分别将周期内的曝气时长设置为60min、90min和120min,研究曝气时间的影响;最后,研究分时段进水运行模式对脱氮效果的影响。实验过程中每个工况稳定运行一定时间后,采用DEK多参数水质在线分析仪(江苏汇环)连续测

定进出水的COD、NH₄⁺-N和TN,分析不同控制方式下CASS工艺的脱氮效果。

2 结果与讨论

2.1 排水比例对脱氮效果影响

如图1控制时序所示,分别将CASS工艺排水比设置为30%、40%和50%,以对比不同排水比条件下CASS工艺对COD、NH₄⁺-N和TN的去除效果。

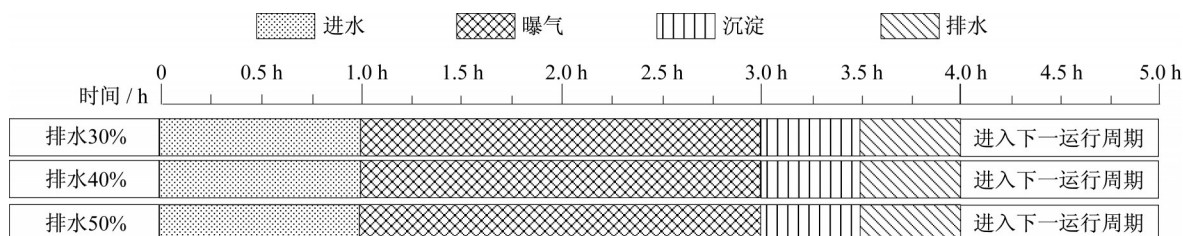


图1 不同排水比的CASS控制时序

Fig.1 CASS control sequence of different drainage ratios

由图2a可知,CASS工艺排水比分别设置为30%、40%和50%时,其出水的COD平均质量浓度分别为 $29.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $38.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $23.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。结果显示,排水比变化对COD去除效果影响较小。污水中有机物在好氧阶段被异氧菌氧化分解,或在缺氧阶段作为反硝化碳源被利用,对于低碳源污水处理而言,COD的去除主要集中在好氧段异养菌的氧化分解。图2-b为不同排水比下CASS工艺对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果,当排水比分别为30%、40%和50%时,出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均质量浓度分别为 $2.58\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,由此可见,当曝气量和曝气时长满足硝化反应要求时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 可以被彻底硝化,而排水比例变化对硝化作用影响甚微(图2b)。从图2c可知,TN去除效果受排水比影响较大,当排水比为30%、40%和50%时,产水中TN分别为 $17.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $9.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,CASS工艺对TN平均去除率分别达到58.3%、78.8%和85.4%。由此可见,TN去除效果随CASS工艺排水比的增加而增加。王加蒙等^[8]也研究发现,适当提高SBR工艺排水比可提升TN去除效果。这是由于SBR和CASS这类间歇式反应器在运行过程中,上一个周期未排出的水会与下一周期的进水混合后再进行处理,当上一周期排水比较大时,下一周期进水量也就会较大,此时剩余水的稀释作用降低,反应器内污水C/N值相对较高。通过对工况1、2和3的前一个周期COD和TN去除率计算发现,当排水比分别为30%、40%和50%时,后一个周期C/N值分别为1.67、2.06和2.22。由此说明增加排水比例可提升进水C/N,从而达到优化脱氮效果的目的。对于本研究而言,即使当排水比增加到50%时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果仍未受到影响,因此排水比参数的确定受原水影响较大,为实现更好的脱氮效果,可考虑在保证COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有效去除的前提下,继续增大CASS工艺排水比,以进一步优化提升CASS工艺深度脱氮效果。

2.2 曝气时间对脱氮效果影响

好氧与厌氧反应时间比是影响脱氮效果的关键参数。分别将曝气时长调整为60min、90min和120min以控制好氧和厌氧时间比来提升脱氮效果,具体控制时序如图3所示。

如图4a所示,当曝气时长为60min、90min和120min时,出水的COD平均质量浓度分别为 $26.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $18.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $31.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,由此说明曝气时长对COD去除效果影响不大。这主要是因为低

碳源污水处理过程中CASS池内微生物处于贫营养状态,对有机物降解速度较快。对于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果如图4b所示,当曝气时长为60min、90min和120min时 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均质量浓度分别为 $5.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $3.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $11.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由此可见曝气时长过大或者过小时都会影响 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果,曝气时间不足则硝化效果不彻底,曝气时间过长则引起污泥絮体破碎,不利于沉淀,硝化菌流失。程诚等^[15]通过响应面法对CASS工艺的优化研究发现,影响 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除的因素按照顺序大小依次为溶解氧浓度>曝气时长>排水比>缺氧搅拌时间。图4c反映不同曝气时长下CASS工艺对TN去除效果。结果表明,减少曝气时长、即相应增加缺氧反应时间并未显著提升脱氮效果,因此对于低C/N污水的脱氮而言,碳源缺乏是影响工艺深度脱氮效果的主要因素,为了进一步提供系统脱氮效果,应首先保证碳源分配。

2.3 进水模式对脱氮效果影响

采用分时段进水的方式,CASS工艺可灵活分配原水中的碳源,实现更好的脱氮效果。本实验分别采用两种不同进水和曝气组合方式(“三段进水A”和“三段进水B”),研究CASS工艺脱氮效果,工艺控制时序如图5所示。

如图6a所示,当CASS工艺分别采用“三段进水A”和“三段进水B”模式运行时,产水平均COD质量浓度分别为 $24.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $27.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,由此可见CASS工艺对COD去除效果几乎不受分时段进水影响。但是当采用多段进水时,CASS工艺对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果受到影响,“三段进水A”和“三段进水B”运行模式下CASS产水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均质量浓度分别为 $13.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $9.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图6b),出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均不满足一级A标准。这是因为分时段进水模式下,好氧与缺氧的交替反应会抑制 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化反应,从而导致在缺氧段氮的形态仍然以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主^[16]。分时段进水对于TN去除有一定提升效果(图6c),“三段进水A”和“三段进水B”运行模式下的出水TN平均质量浓度分别为 $15.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $18.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TN去除效果也较差。分时段进水目的是采用好氧/缺氧的交替运行方式,实现同一周期内不同时序的碳源优化分配,当前一阶段好氧曝气使得水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 硝化为硝酸盐氮后,再进入一部分原水至反应器内,利用新进入水中的碳源实现反硝化脱氮。而在本研究中,就TN去除的提升效果而言,分时段进水不如集中进水模式下增加排水比,这仍然是原污水C/N过低的缘故。黄子洪等^[17]通过

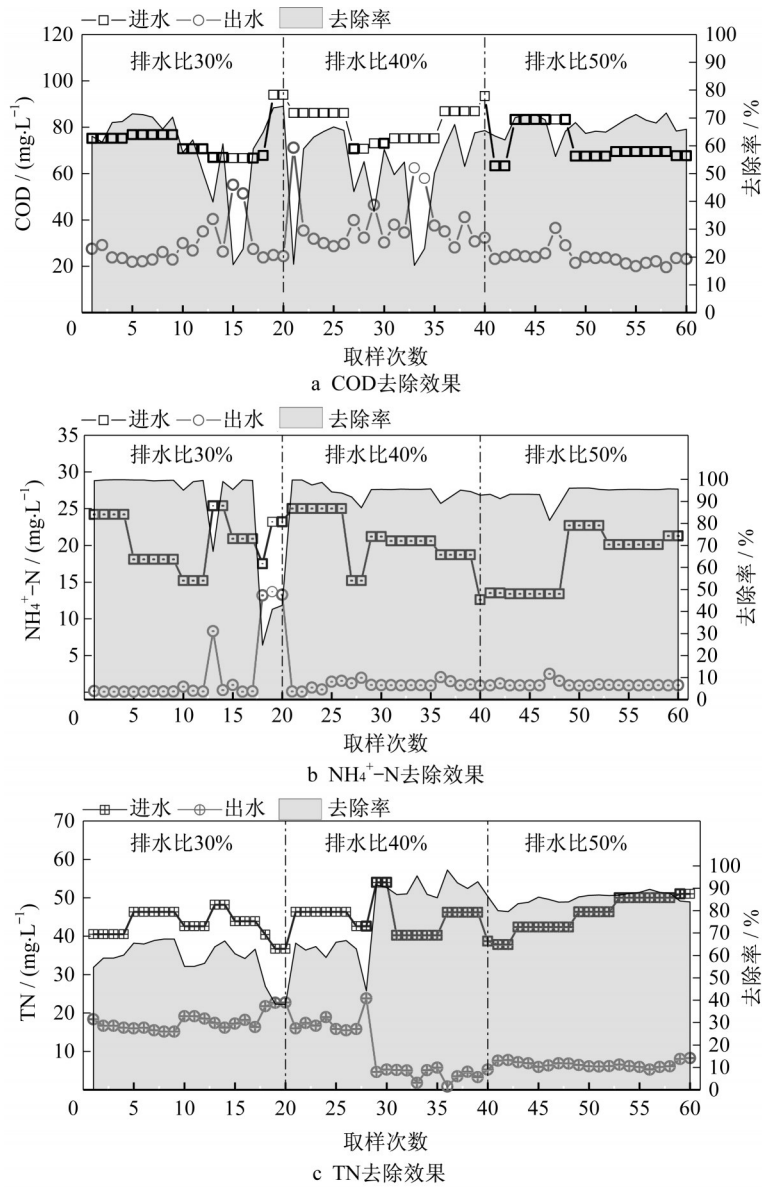


图2 不同排水比CASS去除效果

Fig.2 CASS removal effect in different drainage ratio

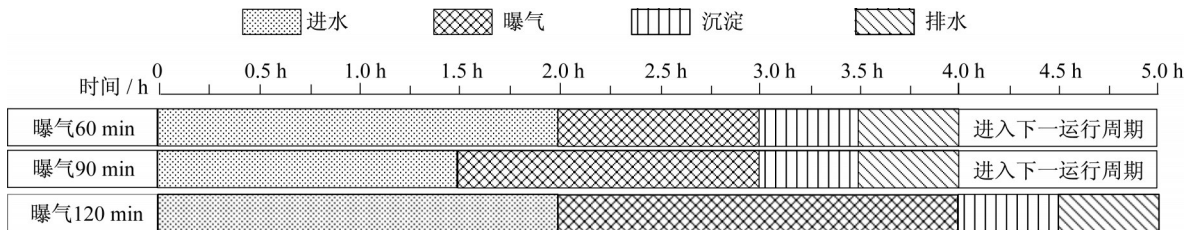


图3 不同曝气时长的CASS控制时序

Fig.3 CASS control sequence for different aeration durations

数学模型优化的方式采用SBR工艺对C/N为4.8~5.5的污水进行处理,结果表明分时段进水SBR工艺对TN去除效果显著优于传统SBR工艺,但实际去除效果低于理论去除效果。郭建华等^[9]采用脉冲SBR工艺对C/N为3~9的城镇污水进行深度脱氮

处理,结果表明仅需投加少量碳源就可使出水 $\text{TN} < 2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。而本实验中原水C/N仅为1.8,原水碳源严重不足,因此在分时段进水过程中,引入碳源的同时也增加了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN,尤其是当采用三段进水B时,CASS工艺无法有效去除最后一段进水中引入

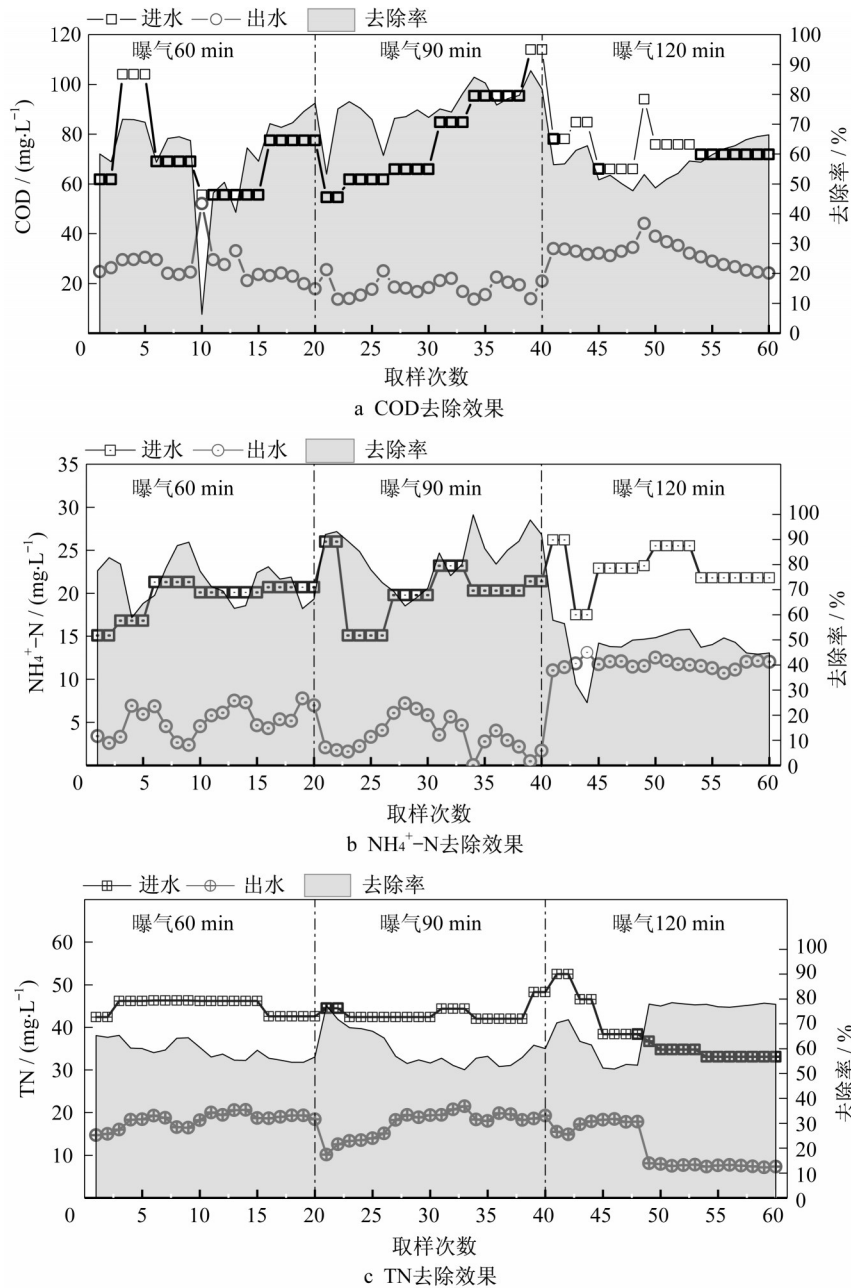


图4 曝气时间变化对污染物去除效果影响

Fig.4 The aeration time on the removal effect of pollutants

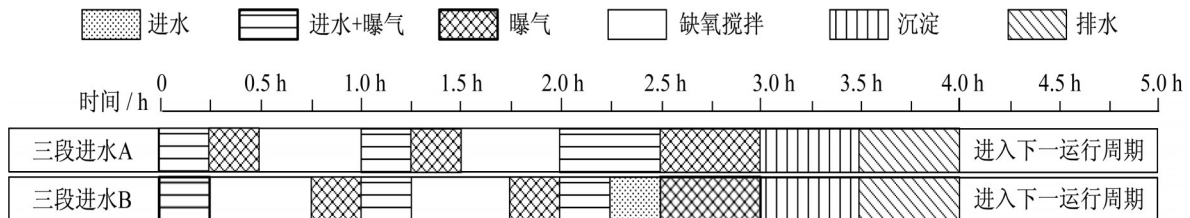


图5 不同进水模式的CASS控制时序

Fig.5 CASS control sequence for different water inlet modes

的NH₄⁺-N,从而导致出水NH₄⁺-N浓度升高。因此对于C/N极低的污水处理,并非增加分时段进水次数越多,脱氮效果越好。

2.4 碳源分配计算

污水处理过程中碳源分配及去向主要包括:同化作用、异化作用、脱氮除磷以及出水,其中有机物

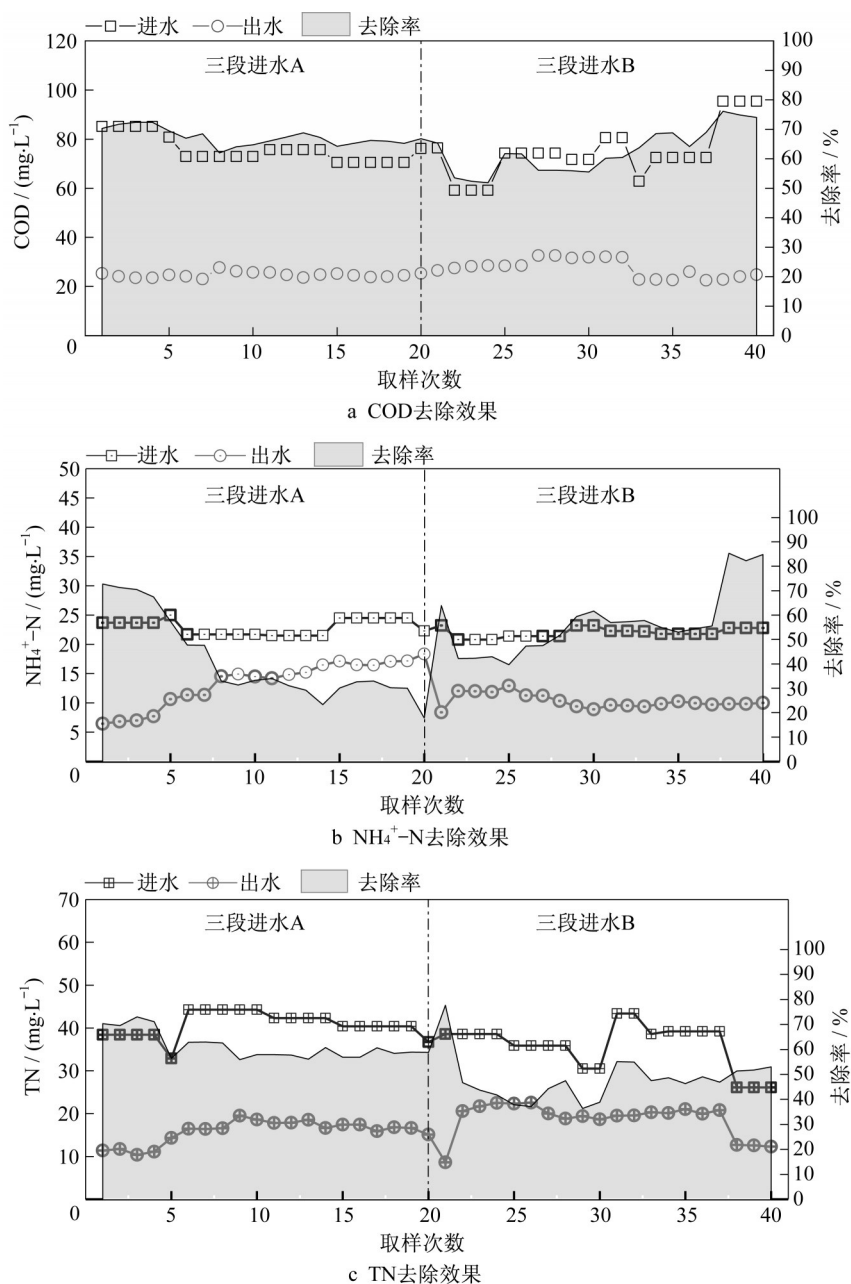


图6 分时段进水对污染物去除效果影响

Fig.6 The effect of segmented water intake on pollutant removal effect

和氮相关的化学计量系数采用国际水协(IWA)的推荐值;根据进水和出水TN的差值计算反硝化TN量,反硝化COD利用系数采用2.86(gCOD/gTN),计算结果见表2。

由表2计算结果可知,原水COD质量浓度介于74.3~81.1 mg·L⁻¹,出水COD质量浓度介于18.4~38.6 mg·L⁻¹,出水COD占进水COD比例约为23.3%~47.7%,此部分COD属于难降解有机物。此外,由于原水C/N值较低,按照每去除1gTN所需2.86g可降解的COD计算可知,进出水COD总量的差值无法满足实际运行过程中反硝化所需COD量。

付国楷等^[18]以COD、NH₄⁺-N和TN分别为129.0、25.6和31.5 mg·L⁻¹(C/N=4.3)生活污水处理过程为研究对象,经碳源分配计算发现,此条件下原水中的碳源可同时满足生化池微生物的同化作用、氧化作用以及脱氮和除磷碳源需求量。而本研究中原水C/N仅为1.8左右,原污水中的碳源无法满足理论计算的反硝化碳源需求量。增加排水比可有效提升TN去除效果,当排水比由30%增加至40%和50%时,CASS对TN平均去除率分别为58.9%、78.8%和85.6%,且当排水比为50%时的COD和TN去除效果均较好,此时进水C/N最低,但计算得到的反硝

表2 不同工况模式下的碳源分配估算

Tab.2 Estimation of carbon source allocation under different working conditions

序号	项目	排水 30%	排水 40%	排水 50%	曝气 60min	曝气 90min	曝气 120min	三段进 水A	三段进 水B	备注
1	进水量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	40	40	40	40	40	40	40	40	
2	进水COD/($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	74.3	81.1	72.4	71.6	78.9	74.5	75.9	74.7	
3	输入COD总量/($\text{g}_{\text{COD}} \cdot \text{d}^{-1}$)	2972.6	3242.0	2897.6	2865.4	3158.8	2979.2	3034.4	2989.6	[1]×[2]
4	出水COD/($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	29.2	38.6	23.9	26.8	18.4	31.9	24.7	27.4	
5	出水COD总量/($\text{g}_{\text{COD}} \cdot \text{d}^{-1}$)	1169.6	1545.8	955.2	1073.8	736.6	1275.2	987.8	1097.2	[1]×[4]
6	进水TN/($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	43.2	44.8	45.9	44.9	43.4	38.0	40.8	36.0	
7	出水TN/($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	17.8	9.5	6.6	18.3	17.4	11.5	15.8	18.7	
8	C/N	1.7	1.8	1.6	1.6	1.8	2.0	1.9	2.1	[2]/[6]
9	反硝化TN量/($\text{g}_{\text{TN}} \cdot \text{d}^{-1}$)	1016.3	1410.5	1569.6	1065.1	1038.9	1060.2	998.2	690.4	([6]-[7])×[1]
10	反硝化COD/($\text{g}_{\text{COD}} \cdot \text{d}^{-1}$)	2906.7	4034.1	4489.2	3046.2	2971.2	3032.1	2854.9	1974.5	[9]×2.86
11	平均COD去除率/%	60.7	52.3	67.0	62.5	76.7	57.2	67.4	63.3	(1-[4]/[2])×100
12	平均TN去除率/%	58.9	78.8	85.6	59.3	59.8	69.8	61.2	48.0	(1-[7]/[6])×100
13	反硝化碳源缺值/($\text{g}_{\text{COD}} \cdot \text{d}^{-1}$)	1103.7	2337.9	2546.8	1254.6	549.0	1328.1	808.3	82.1	-([3]-[5]-[10])

化碳源缺值也最大,达到2546.8gCOD/d。这说明在曝气时间为120min、排水比为50%的工况运行下,原水碳源分配作用较好,同时兼顾硝化和反硝化作用,此工况下TN去除效果提升明显。缩短曝气时间的限氧方式并不能节约碳源消耗,提升TN去除效果,当曝气时长分别为60min、90min和120min时,TN去除率分别为59.3%、59.8%和69.8%,碳源缺值分别为1254.6、549.0和1328.1gCOD。由于原水碳源浓度过低,碳源可在较短时间内被消耗,且好氧段结束后剩余的COD为难降解有机物,难以被反硝化细菌高效利用。因此对于本研究中的污水而言,调整曝气时长并不能有效提升脱氮效果。此外,由于短时曝气运行下硝化效果较差,原水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 未能充分硝化,这也是造成脱氮效果受到影响的原因之一。采用分时段进水的方式对TN去除有一定提升效果,“三段进水A”模式下的TN平均去除率达到61.2%,但提升效果不如改变排水比明显。“三段进水B”模式下运行时,TN平均去除率仅为48%,出水TN平均质量浓度达到18.7 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除效果仍然较差。通过上述分析可知,对原水碳氮比较低的CASS工艺而言,无论是采用分段进水,还是增加缺氧反应时间,均不能有效提升其对TN的去除效果,而增加排水比是最佳方式。

3 结论

以CASS工艺为基础,探讨了排水比、曝气时间以及进水模式对低C/N污水脱氮效果的影响,实验主要结论如下:

(1)实验进水平均COD为79.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TN为45.7 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,C/N约为1.8,通过调整缺氧反应时间

或是采用分时段进水的方式均无法有效提高CASS工艺的脱氮效果,而增加排水比可优化配置碳源,提升TN去除效果。

(2)通过碳源分配计算可知,即使原水中所含碳源无法满足反硝化需求,但当工艺控制参数及时序得到优化时,CASS工艺可在不外加碳源的前提下发挥脱氮潜力。当排水比为50%时,出水TN平均质量浓度可以达到6.6 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

作者贡献说明:

庞维海:实验设计和论文修改;
李惠平:实验操作和论文撰写;
张琨:技术和材料支持。
王曦:技术和材料支持。
谢丽:实验设计和论文修改。

参考文献:

- [1] 唐义,马彦文,万金泉,等.外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能[J].环境科学,2021,42(7):3392.
TANG Yi, MA Yongwen, WAN Jinquan, *et al.* Denitrification performance of two-stage denitrification process with solid slow-release carbon source[J].Environmental Science, 2021, 42(7): 3392.
- [2] BICHSEL Y, GUNTEN U V. Oxidation of iodide and hypiodous acid in the disinfection of natural waters [J]. Environmental Science and Technology, 1999, 33(22):4040
- [3] 王浩,刘国梁,常江,等.化学絮凝-过滤技术对碳源物质富集效果的研究[J].给水排水,2020,56(S1):476.
WANG Hao, LIU Guoliang, CHANG Jiang, *et al.* Study on the effect of chemical flocculation-filtration technology on carbon source material enrichment [J]. Water & Wastewater, 2020, 56(S1):476.
- [4] ZHOU Zhengyao, QI Meixia, WANG Hongping. Achieving

- partial nitrification via intermittent aeration in SBR and short-term effects of different C/N ratios on reactor performance and microbial community structure[J]. *Water*, 2020, 12(12): DOI: 10.3390/W12123485.
- [5] BAI Yihan, SU Junfeng, WEN Qiong, et al. Characterization and mechanism of Mn (II) -based mixotrophic denitrifying bacterium (*Cupriavidus* sp. HY129) in remediation of nitrate (NO₃-N) and manganese (Mn (II)) contaminated groundwater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 408: 124414.
- [6] ZHENG Zhijie, ALI Amjad, SU Junfeng, et al. Layered double hydroxide modified biochar combined with sodium alginate: a powerful biomaterial for enhancing bioreactor performance to remove nitrate [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 323: 124630.
- [7] 彭永臻, 马斌. 低C/N比条件下高效生物脱氮策略分析[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(2): 225.
PENG Yongzhen and MA Bin. Analysis of high-efficiency biological nitrogen removal strategies under low C/N ratio[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(02): 225.
- [8] 王加蒙, 彭澄瑶, 辛振兴, 等. SBR分段进水工艺提高污水厂的脱氮效率[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(5): 2131.
WANG Jiameng, PENG Chengyao, XIN Zhenxing, et al. SBR segmented water inlet process improves the denitrification efficiency of wastewater treatment plants [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2015, 9(5): 2131.
- [9] 郭建华, 彭永臻, 杨庆, 等. 脉冲SBR处理城市污水深度脱氮的工艺特性[J]. *中国环境科学*, 2007(1): 62.
GUO Jianhua, PENG Yongzhen, YANG Qing, et al. Process characteristics of pulsed SBR for advanced denitrification of municipal wastewater [J]. *China Environmental Science*, 2007(1): 62.
- [10] 龚本洲, 周炯, 刘石虎, 等. C/N值对短时曝气SBR高标准脱氮除磷效能的影响[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(15): 13.
GONG Benzhou, ZHOU Jiong, LIU Shihu, et al. The influence of C/N value on the efficiency of short-term aeration SBR high standard nitrogen and phosphorus removal [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(15): 13.
- [11] 兰兰, 赵剑强, 丁晓倩, 等. 限氧连续曝气快速启动亚硝化-厌氧氨氧化工艺[J]. *水处理技术*, 2019, 45(5): 85.
LAN Lan, ZHAO Jianqiang, DING Xiaoqian, et al. Limited oxygen continuous aeration to quickly start the nitrosation-anammox process [J]. *Water Treatment Technology*, 2019, 45(5): 85.
- [12] 郭泓利, 李鑫玮, 任钦毅, 等. 全国典型城市污水处理厂进水水质特征分析[J]. *给水排水*, 2018, 54(6): 12.
GUO Hongli, LI Xinwei, REN Qinyi, et al. Analysis of the characteristics of influent water quality of typical urban sewage treatment plants in China [J]. *Water & Wastewater*, 2018, 54(6): 12.
- [13] 熊鸿斌, 吴胜方, 赵娜娜. 城市污水厂TN、TP达一级A标准的设计运行要点[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(18): 96.
XIONG Hongbin, WU Shengfang, ZHAO Nana. Key points in design and operation of WWTP for TN and TP meeting first level A criteria [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(18): 96.
- [14] LIANG Donghui, HU Yongyou, CHENG Jianhua, et al. Simultaneous sulfamethoxazole biodegradation and nitrogen conversion in low C/N ratio pharmaceutical wastewater by *Achromobacter* sp. JL9 [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 703: 135586.
- [15] 程诚. 基于RSM优化设计CASS工艺处理低碳源污水工艺参数[J]. *环境工程*, 2019, 37(10): 133.
CHENG Cheng. Based on RSM to optimize the design of CASS process for low-carbon source wastewater treatment process parameters [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(10): 133.
- [16] 顾建辉, 李彩珍, 黄天寅, 等. 分段进水SBR处理高浓度氨氮废水的中试研究[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(17): 104.
GU Jianhui, LI Caizhen, HUANG Tianyin, et al. A pilot study on the treatment of high-concentration ammonia-nitrogen wastewater by SBR with segmented water [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(17): 104.
- [17] 黄子洪, 向婷, 方华, 等. 分步进水SBR工艺生物脱氮运行条件优化及数学模拟[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(23): 89.
HUANG Zihong, XIANG Ting, FANG Hua, et al. Operating conditions optimization and mathematical simulation of stepwise water SBR biological denitrification process [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(23): 89.
- [18] 付国楷, 张春玲, 喻晓琴, 等. 低碳源城市污水厂碳源优化利用运行模式研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(8): 61.
FU Guokai, ZHANG Chunling, YU Xiaoqin, et al. Study on the optimal utilization mode of low carbon source urban wastewater treatment plant carbon source [J]. *Journal of Hunan University (Natural Science Edition)*, 2012, 39(8): 61.