

体积比对分段进水工艺处理低浓度废水性能的影响

曹贵华, 王淑莹, 彭永臻, 苗志加

(北京工业大学 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室,
北京市污水脱氮除磷处理与过程控制工程技术研究中心, 北京 100124)

摘要: 采用改良 A^2/O 四点分段进水工艺处理低浓度、低碳氮比城市生活污水。在 HRT 为 8.7 h、SRT 为 15 d、污泥回流比为 75%、进水流量分配比为 20:35:35:10、好氧段 $\rho(\text{DO})$ 为 1~1.5 mg/L 条件下, 通过调整不同的厌氧/缺氧/好氧体积比, 分析体积比对污染物去除性能的影响。结果表明: 不同的体积比对 COD、氨氮的去除基本无影响, 但对 TN、TP 去除影响较大。当厌氧/缺氧/好氧体积比为 4:8:10 时, 对污染物去除效果最佳, 出水 COD、氨氮、总氮、总磷质量浓度分别为 28.12、0.58、9.26、0.43 mg/L。进水碳源有效利用率达 72.4%。通过逐步减少好氧段体积以提高缺氧段体积的策略, 可使进水碳源在各缺氧段或厌氧段被充分利用, 同时有利于反硝化除磷菌的富集, DPAOs 最高比例为 20.9%。

关键词: 分段进水; 脱氮除磷; 废水; 体积比; 碳源有效利用率

中图分类号: X 703.1

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2014)03-0428-08

Influence of Volume Ratio on the Modified Four Step-feed Technology to Treat Weak Wastewater

CAO Gui-hua, WANG Shu-ying, PENG Yong-zhen, MIAO Zhi-jia

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering,
Engineering Research Center of Beijing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The influence of different volume ratio on pollutants removal was studied. The optimal effluent performance of COD, NH_4^+-N , TN and TP were 28.12, 0.58, 9.26 and 0.43 mg/L, respectively, with anaerobic/anoxic/oxic volume ratio of 4:8:10. More than 72% of carbon sources were utilized effectively for phosphorus release and denitrification, and about 12.6% of TN was removed through simultaneous nitrification and denitrification (SND) in oxic zones. The experimental results also indicated that the volume ratio had no distinct effect on COD and NH_4^+-N removal, but had distinct impact on TN and TP removal. At the same time, with the strategy that reduce the volume of the aerobic zone to improve the anoxic volume, the autotrophic bacteria could take full advantage of more carbon sources for denitrification and phosphorus release in each anoxic or anaerobic zone, and which was also conducive to enrich denitrifying poly-phosphate accumulating organisms (DPAOs). The highest proportion of DPAOs was 20.9%.

Key words: step-feed process; nitrogen and phosphorus removal; wastewater; volume ratio; effective utilization of carbon sources

收稿日期: 2012-11-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178007); 北京市科技计划资助项目(D121100000112001)

作者简介: 曹贵华(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事污水生物处理新理论与新技术方面的研究, E-mail: 190905533@qq.com

通信作者: 王淑莹(1953—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事水质科学与水环境恢复工程、城市污水生物处理的技术与应用方面的研究, E-mail: wsy@bjut.edu.cn

利用传统厌氧/缺氧/好氧(A^2/O)工艺处理低浓度、低 $\rho(C)/\rho(N)$ 城市生活污水使得出水水质达到或优于国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)一级A排放标准,在进水水质无法改变以及无外加碳源的条件下,笔者认为关键在于2点:1)对工艺的革新以提高进水碳源有效利用率,确保更多的碳源被反硝化脱氮和聚磷菌厌氧释磷所利用。分段进水工艺广泛应用于美国、日本、加拿大、新加坡等国污水处理厂的工程实例表明该工艺脱氮除磷效率高于传统的BNR工艺,且无需硝化液内循环、水力停留时间短^[1-4];Ge等^[5]利用改良UCT分段进水工艺处理我国北方低 $\rho(C)/\rho(N)$ 比城市生活污水,调整进水流量分配比为40:30:30、缺氧/好氧体积比为1:2,62%±6%的进水COD被有效利用,出水水质优于一级A排放标准;曹贵华等^[6]利用改良A/O四点分段进水脱氮除磷工艺处理我国南方低浓度、低 $\rho(C)/\rho(N)$ 比废水,通过调整合适的进水流量分配比为20:35:35:10,实现了74%的进水COD被有效利用,占COD去除量的88%。因此,可以将 A^2/O 工艺改造为具有同步脱氮除磷功能的分段进水工艺,通过调整合理的进水流量分配比、各段缺氧/好氧体积比、污泥回流比等参数以达到最大的碳源有效利用率。2)在 A^2/O 工艺或分段进水工艺中控制合适的溶解氧(DO)、温度(t)、水力停留时间(HRT)等参数以利于短程硝化反硝化、反硝化除磷或同步硝化反硝化(SND)新技术的实现,通过耦合上述新技术可以降低脱氮除磷时对有机碳源和曝气能耗的需求。Zeng等^[7-8]研究了 A^2/O 工艺实现短程硝化反硝化以及反硝化除磷的可行性,通过调整好氧段 $\rho(DO)$ 为0.3~0.5 mg/

L,提高硝化液内回流比、缩短好氧段实际HRT为1.03 h以及减少进水量提高系统总体HRT为13.96 h的协同控制方式,最终达到亚硝积累量达90%、氨氮去除率为95%、TN去除率为77%,同时66%~91%的磷通过反硝化除磷的形式去除;葛士建等^[9]通过调整改良UCT分段进水工艺体积分配为1:3:6,成功富集反硝化除磷菌,最高比例达39.2%;王伟等^[10]、Peng等^[11]在分段进水工艺中通过控制各好氧段较低DO浓度以及高污泥浓度成功实现了强化系统的SND作用,分别占TN去除率的33.6%和35%。

本研究基于上述思路研究了不同的厌氧/缺氧/好氧体积比对改良 A^2/O 四点分段进水工艺(modified four anaerobic/anoxic/oxic step-feed process,简称MFSF process)处理低浓度、低 $\rho(C)/\rho(N)$ 比城市污水脱氮除磷性能的影响,以及通过物料衡算考察不同体积比对进水碳源有效利用率、反硝化除磷菌的富集和同步硝化反硝化的影响。

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行程序

改良 A^2/O 四点分段进水脱氮除磷系统由原水箱、改良型多段A/O反应器、二沉池3部分顺序连接组成,系统实验装置如图1所示。原水箱由聚氯乙烯塑料制作而成,容积为185 L。改良型多段A/O反应器由无色有机玻璃构成,总容积82.5 L,有效容积为67 L,共7个区域,依次为预缺氧段、厌氧段、好氧1段、缺氧2段、好氧2段、缺氧3段、好氧3段,每个功能区域之间安装可拆卸隔板,隔板上装有连通管推动水流前进,并避免返混。二沉池为竖流式,

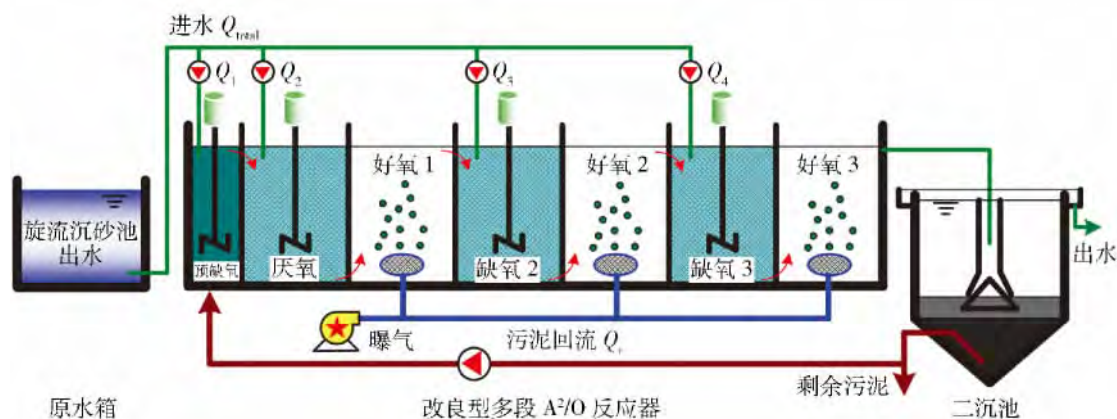


图1 改良 A^2/O 四点分段进水脱氮除磷系统

Fig. 1 Schematic diagram of modified four A^2/O step-feed process

总体积 30 L. 试验采用 5 台蠕动泵分别控制进水和污泥回流. 城市废水由原水箱通过蠕动泵进入预缺氧段、厌氧段、缺氧段 2 和缺氧段 3, 二沉池污泥回流至预缺氧段; 采用空压机为系统好氧格室曝气, 好氧段以黏砂块为微孔曝气器, 用转子流量计调节曝气量; 4 台电动搅拌机分别为厌氧区和缺氧区提供搅拌.

1.2 接种污泥与实验用水

实验在江苏省扬州市某污水处理厂进行, 接种污泥取自该污水厂 Orbal 氧化沟 ($4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) 内沟的活性污泥并以分段进水工艺直接自然驯化, 处理负荷以 25%、50%、100% 逐渐递增, 2~3 周后系统污泥驯化完成, 氨氮去除率达 90% 以上, 二沉池出水悬浮物质量浓度小于 20 mg/L , 系统达到稳定. 实验用水取自该厂旋流式沉砂池出水, 进水水质如下: $\rho(\text{COD})$ 为 $148 \pm 34 \text{ mg/L}$; $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 $29.21 \pm 4.15 \text{ mg/L}$; $\rho(\text{TN})$ 为 $29.79 \pm 4.23 \text{ mg/L}$; $\rho(\text{TP})$ 为 $3.00 \pm 0.84 \text{ mg/L}$; $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ 为 4.93 ± 1.14 ; $\rho(\text{C})/\rho(\text{P})$ 为 51.5 ± 12.6 .

1.3 分析项目与方法

COD、 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、TN、TP、MLSS、MLVSS 按照标准方法测定^[12], pH、DO、ORP 和温度采用 WTW340i 测定仪(德国)测定.

1.4 实验条件与运行方案

改良 A^2/O 四点分段进水生化系统在室温 ($17 \sim 23^\circ\text{C}$) 条件下运行. 整个试验期间总进水流量 Q_{total} 不变, 为 185 L/d , 相应的总平均水力停留时间 8.7 h , 污泥停留时间控制为 15 d 左右, 污泥回流比为 75%. $\rho(\text{MLSS})$ 为 5.66 g/L , $\rho(\text{MLVSS})$ 为 2.95 g/L ; 厌氧、缺氧段 $\rho(\text{DO})$ 控制在 $0.05 \sim 0.15 \text{ mg/L}$, 好氧段 $\rho(\text{DO})$ 维持在 $1 \sim 1.5 \text{ mg/L}$; 预缺氧段、厌氧段、缺氧段 2 和缺氧段 3 四点进水流量分配比为 20:35:35:10. 由于反应器被均分为 22 个格室, 每个格室间都配有插槽, 可通过反应器内安装的可拆卸插板来调整厌氧、缺氧、好氧体积的大小. 因此, 在其他运行条件不变的情况下, 通过改变不同的厌氧/缺氧/好氧体积比, 考察 4 个不同运行工况下系统对污染物去除效果. 各阶段的运行模式及运行参数如表 1 所示.

1.5 污染物物料衡算方法

为了分析体积比对进水碳源有效利用率、SND 作用以及反硝化除磷量的影响, 实验在第 26 天、54 天、90 天和 111 天分别取过程样并通过物料衡算计算碳、氮、磷等污染物在各段的去除量, 具体物料衡算公式参见曹贵华等^[6]已发表文献.

表 1 试验运行工况及运行参数

Table 1 Experimental procedure and parameter for the MFSF process in steady state experiments

工况	时间	$V_{\text{pre-dn}}:V_{\text{an}}:V_{\text{dn}}:V_{\text{o}}$ (每段缺氧/好氧体积比)	HRT/h				营养物比例	
			预缺氧	厌氧	缺氧	好氧	$\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$	$\rho(\text{C})/\rho(\text{P})$
1	第 1 天— 第 31 天	2:4:4:12 (2:4)	0.79	1.58	1.58	4.75	3.41~7.61 (5.13)	28.27~69.27 (50.6)
2	第 32 天— 第 35 天	2:6:4:10 (2:3)	0.79	2.37	1.58	3.95	2.18~8.57 (4.69)	21.75~83.76 (51.4)
3	第 66 天— 第 92 天	2:4:6:10 (3:3)	0.79	1.58	2.37	3.95	3.14~7.80 (5.34)	33.43~80.79 (52.6)
4	第 93 天— 第 120 天	2:5:7:8 (4:2)	0.79	1.98	2.77	3.16	2.86~7.10 (4.56)	28.49~92.87 (57.0)

注: $V_{\text{pre-dn}}$ 、 V_{an} 、 V_{dn} 、 V_{o} 分别表示预缺氧段、厌氧段、总缺氧段和总好氧段的体积; 括号的数据分别代表 $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ 、 $\rho(\text{C})/\rho(\text{P})$ 的平均值

2 实验结果与讨论

2.1 体积比对 COD 去除及利用率的影响

不同厌氧/缺氧/好氧体积比条件下的 COD 去除效果如图 2(a) 所示. 可知在进水 COD 质量浓度波动较大的情况下, 不同体积比对 COD 的去除没有显著影响, 其出水水质浓度和去除率比较稳定. Run1~Run4 工况下平均出水 COD 质量浓度分别为 33.86、29.46、28.12 和 31.00 mg/L , 去除率分别为

76%、78%、82% 和 77%; 并且出水水质中 100% 的 COD 质量浓度低于国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002) 一级 A 排放标准. 结合表 1 发现, Run1~Run4 工况下总好氧段的 HRT 从 4.75 h 降至 3.12 h , 缺氧段 HRT 逐步提高, 出水 COD 质量浓度亦没有变差; 根据改良 A^2/O 四点分段进水工艺的进水特点以及 COD 沿程变化规律及去除量(见图 3) 分析认为, 由于原水首先进入厌氧段和缺氧段, 绝大部分进水 COD 被厌氧释磷及缺氧

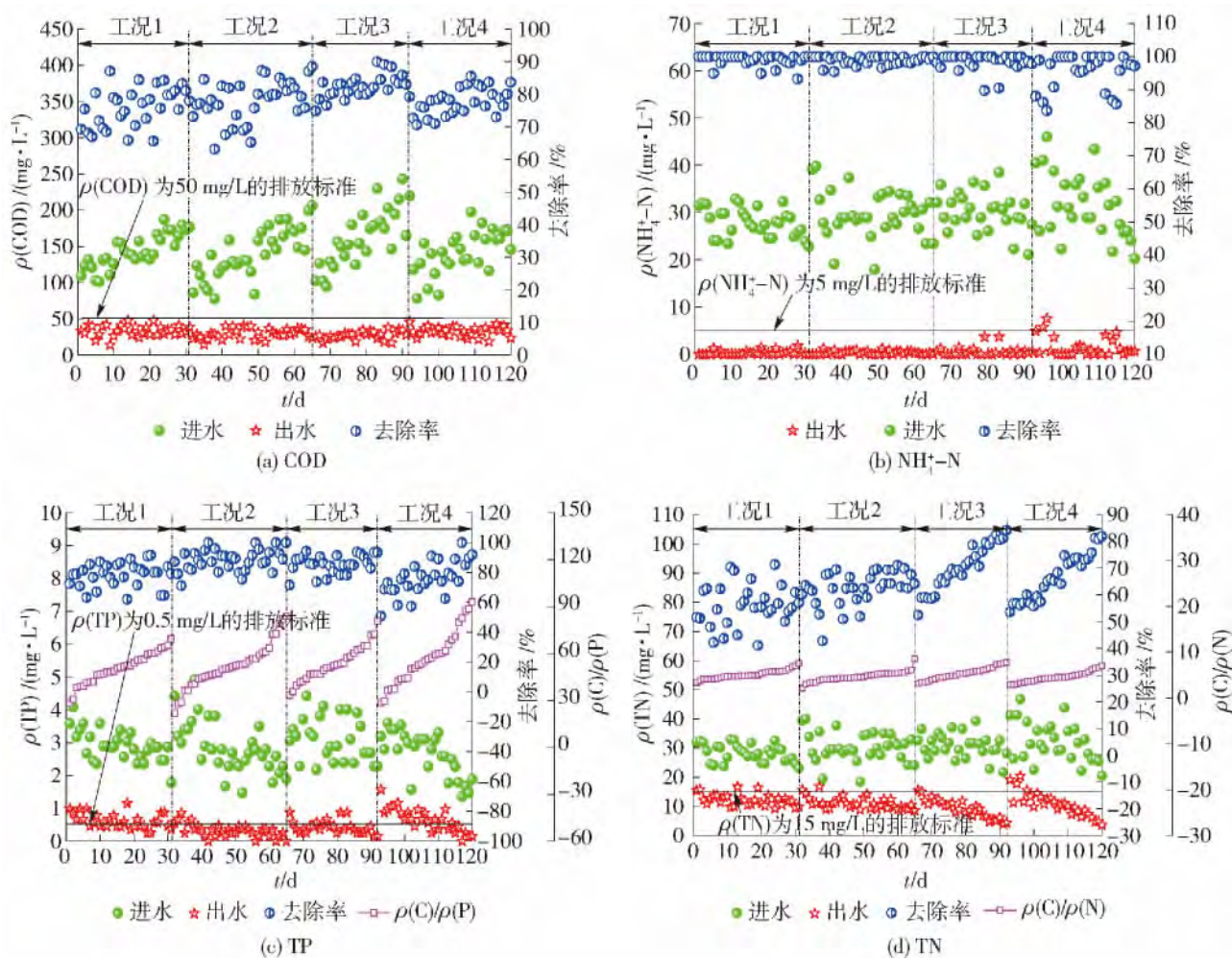


图2 不同体积比下污染物去除效果

Fig. 2 Pollutants removal efficiency of system under different operational conditions

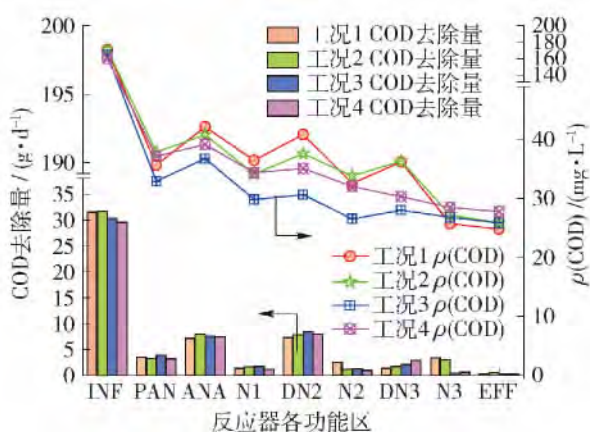


图3 不同工况下 COD 沿程变化规律及去除量

Fig. 3 Evolution and removal of COD in the MFSF process at various volume ratios

反硝化所利用,只有少量 COD 通过各好氧段曝气降解,因此从脱氮除磷角度考虑影响系统氮磷去除的关键在于进水碳源是否在厌氧段和缺氧段被充分

利用。

不同体积比下进水碳源有效利用率如图3所示,4个工况下 COD 在各好氧段降解量分别为 7.3 g/d (23.11%)、5.7 g/d (17.98%)、3.3 g/d (10.85%) 和 2.7 g/d (9.08%),在各缺氧段和厌氧段的去除量分别为 19.4 g/d (61.42%)、20.7 g/d (65.48%)、22.0 g/d (72.35%) 和 21.5 g/d (72.78%),从工况1到工况4随着缺氧段、厌氧段体积的增加以及相应好氧段体积的减少,进水碳源的有效利用率随之增加,在好氧段 COD 被氧化分解量也随之降低。这一现象说明增大缺氧段和厌氧段的总体积有利于进水碳源被异养菌反硝化脱氮和聚磷菌厌氧释磷所利用,从而提高进水碳源的有效利用率,但并非无限制地增加缺氧段和厌氧段的总体积,还需根据进水 $\rho(C)/\rho(N)/\rho(P)$ 以及满足好氧段自养菌硝化和聚磷菌吸磷所需的体积容量进行调整。从工况3和工况4就可以发现,在满足好氧段

硝化的前提下工况 4 增加了缺氧段和厌氧段的总体积,但进水碳源有效利用率与工况 3 几乎等同,其原因主要受进水 $\rho(C)/\rho(N)/\rho(P)$ 值的限制,在进水 $\rho(C)/\rho(N)/\rho(P)$ 为 50:10:1 时,即使继续增大缺氧段和厌氧段的总体积,由于没有足够多的碳源,也从根本上抑制氮磷的去除率以及进水碳源的有效利用率的提高。另外,从图 3 中 COD 沿程变化规律发现在进水碳源有限的情况下,工况 4 增大缺氧段体积,在缺氧段 2 和缺氧段 3 中 COD 变化幅度增加很小甚至是降低,说明增加缺氧段足够的停留时间可以实现 COD 充分利用,甚至还可以实现微生物的内源反硝化作用,从而提高系统对 TN 的去除率。

因此,由于微生物的硝化、反硝化、释磷/吸磷等作用时间的函数,合适的 V_{dn}/V_o 显得至关重要。当缺氧段体积较大时, COD 在缺氧段能被充分利用,后续好氧段被氧化分解量就大大减少;反之,如果缺氧段体积较小, COD 还没有足够停留时间被充分利用,则会导致更多的 COD 在好氧段被无效降解,从而造成碳源的浪费。由此可见,通过逐步减少好氧段 HRT 以提高缺氧段 HRT 的策略,理论上可以使进水中碳源在各缺氧段或厌氧段被充分利用,从而提高系统氮、磷去除率。为了工艺的设计和推广应用,建议改良 A^2/O 四点分段进水工艺 V_{dn}/V_o 为 3:3。

2.2 体积比对磷去除特性的影响

不同厌氧/缺氧/好氧体积比对 TP 的去除有显著影响(见图 2(c)), Run1 ~ Run4 工况下平均出水 TP 质量浓度分别为 0.62、0.32、0.43 和 0.66 mg/L,去除率分别为 78.4%、88.6%、86.1% 和 76.1%;结合表 1 和图 4 中正磷沿程变化规律可知 Run1、Run2 和 Run3 平均进水 $\rho(C)/\rho(P)$ 为 50.2、51.4 和 52.6 时,厌氧段 HRT 分别由 1.58 h 增加到 2.37 h 再降至 1.58 h,相应的厌氧段释磷率 257%、434% 和 299%,则出水 TP 质量浓度由 0.62 mg/L 降至 0.32 mg/L 再升至 0.43 mg/L,厌氧释磷量、出水 TP 变化规律与厌氧段 HRT 变化规律相同。说明通过增加厌氧段体积有利于 PAOs 厌氧释磷,释磷量越大, PAOs 储存的内碳源 PHA 越大,后续好氧吸磷动力越足;反之减少厌氧段体积则会降低磷释放量,从而影响出水 TP 质量浓度。这一结论与葛士建等^[9]提到的释磷量、缺氧/好氧吸磷速率和磷去除率均随厌氧池体积的增加而增加一致。磷的去除除了与厌氧段体积有密切关系外,合适的好氧段体积也是必不可少的因素。从表 1 和图 2(c) 可知,相比于 Run3

工况, Run4 工况增加了厌氧段体积但减少了好氧段体积,且厌氧释磷率达到 332% (见图 4),同时 Run4 工况进水 $\rho(C)/\rho(P)$ 高于前 3 个运行工况,从而忽略进水 $\rho(C)/\rho(P)$ 和厌氧段体积作为限制性因素,好氧段体积仅作为考察目标;减少好氧段 HRT 至 3.16 h,平均出水 TP 质量浓度升高至 0.66 mg/L,说明降低好氧段的 HRT 会影响聚磷菌好氧吸磷是否彻底。

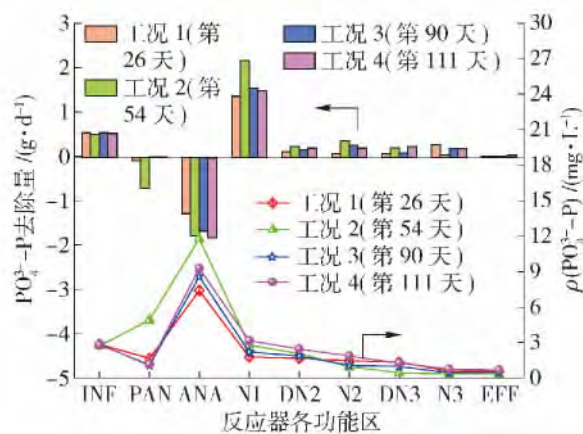


图 4 不同工况下 PO_4^{3-} 沿程变化规律及去除量

Fig. 4 Evolution and removal of PO_4^{3-} in the MFSS process at various volume ratios

另外,从图 4 发现系统在 DN2 和 DN3 发生了磷的去除,并且 4 个工况下 DN2 和 DN3 的磷去除总量分别为 0.16、0.41、0.21 和 0.40 g/d,占总吸磷量的 8.70%、13.9%、10.0% 和 17.9%。为了分析这一现象,实验在不同阶段分别取泥样进行缺氧/好氧吸磷的批式实验,根据 Wachtmeister 等^[13]方法计算 DPAOs 占 PAOs 的比例,如图 5 所示。结果表明系统中存在 DPAOs,4 个工况下 DPAOs 占 PAOs 的比例分别为 10.9%、16.9%、13.3% 和 20.9%,说明不同的缺氧/好氧体积比对系统在缺氧段的吸磷量以及 DPAOs 富集有一定影响。缺氧吸磷量以及 DPAOs 富集随着 V_{dn}/V_o 增大而增大。分析原因认为:一是由于进水 $\rho(C)/\rho(N)$ 较低,进水氨氮在各好氧段被氧化成硝态氮后,在缺氧段由于缺少足够有机物电子供体使得反硝化脱氮不彻底,为 DPAOs 的富集提供了硝态氮;二是系统污泥中的聚磷菌在厌氧池经过释磷后首先进入 N1 进行好氧吸磷,在逐步减小好氧段体积并增加缺氧段体积后,聚磷菌在好氧段由于缺少足够代谢时间吸磷,使得更多的从聚磷菌体内释放的磷在后续缺氧段被 DPAOs 利用,从而为 DPAOs 的富集创造了有利的生长环境。

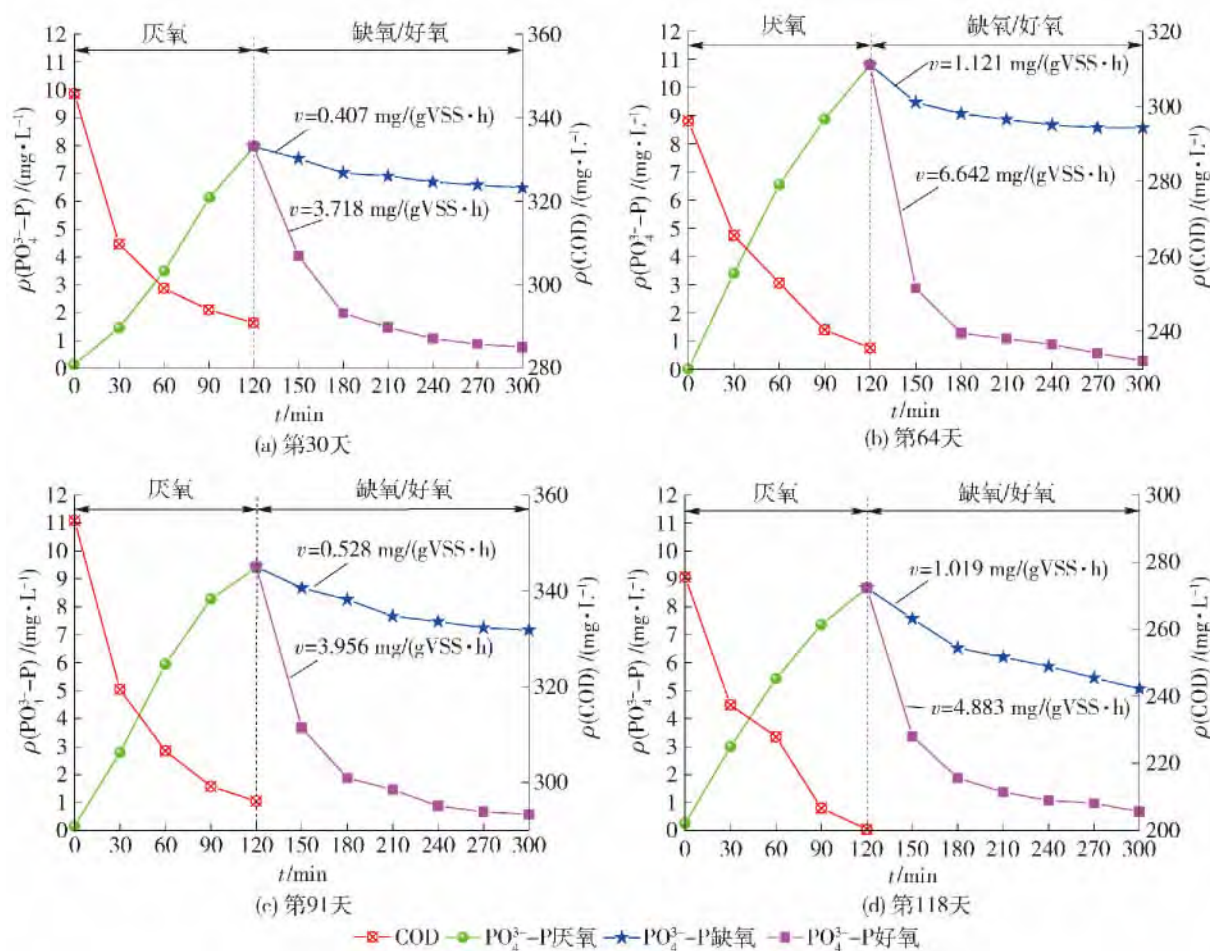


图5 不同阶段活性污泥放磷、吸磷静态试验

Fig. 5 Phosphorus release and uptake with the activated sludge obtained from different operation phases

从上述分析发现,改良 A^2/O 四点分段进水工艺中对磷的去除绝大部分依靠聚磷菌的厌氧释磷及好氧过量吸磷作用,而反硝化除磷量只占一小部分;除了聚磷菌除磷的本质特性之外,4个运行工况中出水 TP 质量浓度与进水 $\rho(\text{C})/\rho(\text{P})$ 还有着密切关系(见图 2(c)),出水 TP 质量浓度随着 $\rho(\text{C})/\rho(\text{P})$ 的升高而降低,相应的 TP 去除率逐步升高。综上所述,改良 A^2/O 四点分段进水工艺中磷的去除不仅与进水 $\rho(\text{C})/\rho(\text{P})$ 有直接关系,而且合适的厌氧/好氧体积比也成为制约磷出水是否达标的—个关键因素;因此,从 TP 出水达 GB18918—2002 一级 A 排放标准角度考虑,Run2 和 Run3 工况的厌氧/好氧体积比均可作为实际工艺设计和运行选择参数提供参考。

2.3 体积比对 TN 去除特性的影响

2.3.1 体积比对 TN 去除性能的影响

不同体积比对 TN 去除的影响见图 2(d),Run1 至 Run4 工况下平均出水 TN 质量浓度分别为 12.3、11.1、9.26 和 10.8 mg/L,去除率分别为 56.1%、

62.7%、70.2% 和 66.7%,表明不同缺氧/好氧体积比对 TN 去除有较大影响;同时系统 4 个运行工况下各自随着进水 $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ 的逐步升高,出水 TN 表现出不同的规律(见图 2(d))。Run1 和 Run2 工况下出水 TN 比较稳定,该现象与传统的异养菌反硝化脱氮以及进水 $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ 相互之间关系不符合,分析原因主要是 Run1 和 Run2 工况缺氧段的总 HRT 为 2.37 h,不能为异养菌反硝化脱氮提供充足的反应时间,导致了进水碳源没有被反硝化充分利用,剩余的有机碳源在好氧区被氧化分解,限制了系统 TN 去除率随进水 $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ 的升高而提高;而 Run3 和 Run4 工况下出水 TN 随进水 $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ 的提高而降低,由于增加了缺氧反硝化的容积,为反硝化脱氮提供了足够的反应时间使得碳源被反硝化有效利用。同时通过取系统中的污泥样进行硝化反硝化的静态批式实验(见图 6),进一步证实了增大缺氧区容积有利于反硝化的彻底完成以及提高 TN 去除率。从图 6 可见,完成反硝化脱氮至少需 210

min, 其中反硝化段前 120 min 内反硝化速率达到 $9.32 \times 10^{-3} \text{ mg}/(\text{mgMLSS} \cdot \text{d})$, 120 ~ 210 min 内反硝化速率降低为 $2.39 \times 10^{-3} \text{ mg}/(\text{mgMLSS} \cdot \text{d})$. 缺氧阶段出现 2 个不同的反硝化速率与 2 个时间段的可利用碳源有密切关系; 从理论上讲, 当进水 $\rho(\text{BOD}_5)/\rho(\text{TKN}) \geq 2.86$ 就能进行脱氮, 一般认为 $\rho(\text{BOD}_5)/\rho(\text{TKN}) \geq 4$ 才能进行有效脱氮^[14]. 试验中 300 ~ 420 min 内起始进水 $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ 为 5.06 可以完成异养菌反硝化脱氮, 相应的反硝化速率较快; 但 420 ~ 510 min 内起始进水 $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ 仅为 2.85, 可利用碳源相对很少, 传统的异养菌反硝化脱氮受到抑制, 微生物的内源反硝化成为脱氮的主要途径, 反硝化速率也相应降低; 因此, 本研究中平均进水 $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ 为 4.93 的前提下, 当缺氧段容积充足时, TN 的去除主要来自于异养菌反硝化脱氮和微生物的内源反硝化; 而缺氧段容积不足时, TN 的去除主要由部分异养菌反硝化脱氮实现. 所以, 对于低浓度、低 $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ 的生活污水, 因进水可利用的有机物少, 在确保氨氮硝化的前提下要适当增加缺氧段和好氧段的体积比以保证缺氧区水力停留时间, 而缺氧区容积大小直接影响反硝化是否彻底; 同时, 适当增加缺氧区容积使得传统异养菌反硝化脱氮后还可实现部分微生物的内源反硝化, 从而提高对 TN 的去除率.

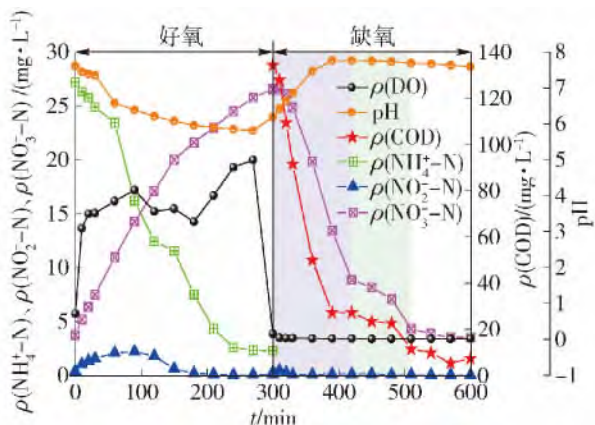


图6 硝化反硝化静态实验

Fig. 6 Static experiment of nitrification and denitrification

2.3.2 体积比对 TN 去除贡献率的影响

TN 去除贡献率在本研究中被定义为微生物的各种脱氮作用占 TN 去除量的比例, 如异养菌反硝化脱氮、反硝化除磷脱氮、内源反硝化脱氮、同步硝化反硝化脱氮以及微生物自身同化作用等. 通过物料衡算计算改良 A²/O 四点分段进水工艺各段 TN 的去除量, 如图 7 所示, 发现各缺氧段和各好氧段都

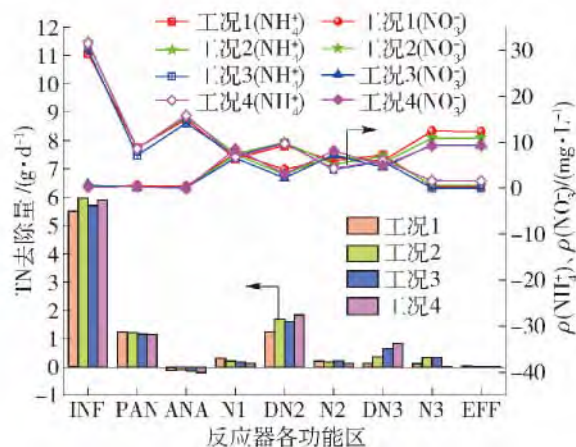


图7 不同工况 NH_4^+ 、 NO_3^- 沿程变化规律及 TN 去除量

Fig. 7 Evolution of NH_4^+ , NO_3^- , TN removal in the MFSF process at various volume ratios

发生了 TN 的去除. 4 个运行工况下 TN 在各缺氧段的去除量分别为 2.61、3.25、3.39 和 3.80 g/d, 这部分 TN 的去除主要由传统的异养菌反硝化脱氮贡献. 结合表 1 可知, 平均进水 $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ 为 4.93, 缺氧段异养菌反硝化脱氮的贡献率随着缺氧段容积的增加而增加, 主要是由于提供了足够的反应时间使得异养菌充分利用进水碳源实现反硝化脱氮; 同时在缺氧段还发生了部分反硝化除磷现象(见图 4). 4 个运行工况下在各好氧段 TN 去除量分别为 0.63、0.69、0.72 和 0.26 g/d, 可见好氧段容积的大小影响 TN 在好氧段的去除量, 工况 1 至工况 3 中好氧段 HRT 约为 4 h 或以上, TN 在好氧段去除量相差不大; 当好氧段 HRT 降低到工况 4 的 3 h 左右, 相应的 TN 去除量只有前 3 个运行工况的 1/3 左右, 分析认为是好氧段参与反应的微生物总量减少的原因. 另外, 好氧段发生 TN 的去除, 分析认为是发生了同步硝化反硝化作用, 考虑有 2 种原因: 一是 Kugleman 等^[15]认为缺氧段进行反硝化微生物的反硝化酶进入好氧段后在某一时间段仍保持原有特性进行反硝化, 但是这种特性的保持是随着好氧时间的延长而逐渐受到抑制; 本工艺中由于分段进水缺氧/好氧交替运行的模式将总的好氧时间分隔成几个部分, 从而减缓了好氧曝气对反硝化酶活性的抑制. 二是 Tonkovic^[16]、Littleton 等^[17]发现 SND 往往发生在碳源非常不足的情况下, 而且对 SND 贡献的许多微生物是自养型的; 本实验中进水 $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ 已经很低, 并且经过缺氧段后进入好氧段的 COD 已非常少, 因此不排除有这种微生物存在的可能性.

所以, 试验中虽然增加缺氧段体积导致传统异

养菌反硝化脱氮率增加,但是在总 HRT 不变的情况下相应的好氧段体积会减少,而好氧段体积的减少则会降低 SND 在好氧段对 TN 去除的贡献率,因此合适的 V_{dn}/V_o 显得至关重要。

3 结论

1) 利用改良 A²/O 四点分段进水工艺处理低浓度、低 $\rho(C)/\rho(N)$ 城市废水,进水流量分配比为 20:35:35:10、HRT 为 8.7 h、污泥回流比为 75%,通过逐步减少好氧段体积以提高缺氧段体积的策略,可使进水碳源在各缺氧段或厌氧段被充分利用;当厌氧/缺氧/好氧体积比为 4:8:10 时系统对污染物去除效果最佳,进水碳源有效利用率达 72.4%。

2) 改变厌氧/缺氧/好氧体积比,系统对 COD、氨氮的去除基本无影响,但对 TN、TP 去除影响较大。

3) 系统对氮的去除主要以传统反硝化脱氮方式完成,同时在好氧段存在 SND 现象;随着 V_{dn}/V_o 体积比的增大,传统反硝化脱氮效果提高, SND 作用削弱。

4) 系统对磷的去除主要依靠聚磷菌的厌氧释磷及好氧过量吸磷作用,缺氧反硝化除磷量只占一小部分;缺氧吸磷量以及 DPAOs 富集随着 V_{dn}/V_o 增大而增大, DPAOs 最高比例为 20.9%;释磷量和磷去除率均随厌氧池体积的增加而增加,降低好氧段的体积会影响聚磷菌好氧吸磷效果。

参考文献:

- [1] CARRIO L, STREETT F, MAHONEY K, et al. Practical considerations for design of a step-feed biological nutrient removal system [C] // Proceedings of Water Environment Federation 73rd Annual Conference and Exposition on Water Quality and Wastewater Treatment. Anaheim: Water Environment Federation, 2000: 803-823.
- [2] CRAWFORD G, BLACK S, ELLIOTT M, et al. The step bio-process at lethbridge-over one full year of operation [C] // Proceedings of Water Environment Federation 73rd Annual Conference and Exposition on Water Quality and Wastewater Treatment. Anaheim: Water Environment Federation, 2000: 872-887.
- [3] FILLOS J, RAMALINGAM K, THOMATOS S, et al. Full-scale evaluation of step-feed BNR process at a New York City water pollution control plant [C] // Proceedings of Water Environment Federation 75th Annual Technical Exhibition and Conference on Water Quality and Wastewater Treatment. Alexandria: Water Environment Federation, 2002: 100-109.
- [4] 葛士建, 彭永臻. 连续流分段进水工艺生物脱氮除磷技术分析 & 优化控制 [J]. 环境科学学报, 2009, 29 (12): 2465-2470.
GE Shi-jian, PENG Yong-zhen. Analysis and optimization control of continuous step feed biological nitrogen and phosphate removal process [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29 (12): 2465-2470. (in Chinese)
- [5] GE S J, PENG Y Z, WANG S Y, et al. Enhanced nutrient removal in a modified step feed process treating municipal wastewater with different inflow distribution ratios and nutrient ratios [J]. Bioresource Technology, 2010, 101: 9012-9019.
- [6] 曹贵华, 王淑莹, 彭永臻, 等. 流量分配比对改良 A/O 分段进水脱氮除磷特性的影响 [J]. 化工学报, 2012, 63(4): 1249-1257.
CAO Gui-hua, WANG Shu-ying, PENG Yong-zhen, et al. Nitrogen and phosphorus removal in modified A/O step-feed process for urban sewage with different inflow distribution ratios [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2012, 63 (4): 1249-1257. (in Chinese)
- [7] ZENG W, LI L, YANG Y Y, et al. Nitrification and denitrification of domestic wastewater using a continuous anaerobic-anoxic-aerobic (A₂O) process at ambient temperatures [J]. Bioresource Technology, 2010, 101 (21): 8074-8082.
- [8] ZENG W, LI L, YANG Y Y, et al. Denitrifying phosphorus removal and impact of nitrite accumulation on phosphorus removal in a continuous anaerobic-anoxic-aerobic (A₂O) process treating domestic wastewater [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2011(48): 134-142.
- [9] 葛士建, 王淑莹, 曹旭, 等. 分段进水脱氮除磷工艺中反硝化除磷的实现与维持 [J]. 化工学报, 2011, 62 (9): 2615-2622.
GE Shi-jian, WANG Shu-ying, CAO Xu, et al. Achievement and maintenance of denitrifying phosphorus removal in step feed nutrient removal process [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2011, 62 (9): 2615-2622. (in Chinese)
- [10] 王伟, 王淑莹, 孙亚男. 分段进水 A/O 工艺在低 DO 下处理生活污水研究 [J]. 中国给水排水, 2007, 23 (21): 1-5.
WANG Wei, WANG Shu-ying, SUN Ya-nan. Step-feed A/O process for treatment of domestic sewage under low DO concentration [J]. China Water and Wastewater, 2007, 23(21): 1-5. (in Chinese)

(下转第 465 页)

- Taiyuan University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [7] 吕丹,朱亮,朱浩,等. 不同应力状态下 6061 铝合金力学性能及断裂行为的研究[J]. 轻合金加工技术, 2010, 38(4): 52-55.
- LÜ Dan, ZHU Liang, ZHU Hao, et al. Study of mechanics property and fracture behaviors on 6061 aluminum alloy under different stress states [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2010, 38(4): 52-55. (in Chinese)
- [8] 张文泉,张学昆. 金属材料拉伸缺口变形行为的研究[J]. 实验室研究与探索, 2007, 26(11): 169-171, 179.
- ZHANG Wen-quan, ZHANG Xue-kun. Notch deformation behaviors of metallic material during tensile testing [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2007, 26(11): 169-171, 179. (in Chinese)
- [9] 臧金鑫,冯朝辉,张显峰,等. 热变形参数对新型 Al-Zn-Mg-Cu 高强铝合金微观组织的影响[J]. 塑性工程学报, 2011, 18(5): 38-42.
- ZANG Jin-xin, FENG Zhao-hui, ZHANG Xian-feng, et al. Influence of the deformation parameters on microstructures of a new Al-Zn-Mg-Cu high strength aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011, 18(5): 38-42. (in Chinese)
- [10] 徐恒钧. 材料科学基础[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2001: 409.
- (责任编辑 张 蕾)

(上接第 435 页)

- [11] PENG Y Z, GE S J. Enhanced nutrient removal in three types of step feeding process from municipal wastewater [J]. Bioresource Technology, 2011(102): 6405-6413.
- [12] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater: 4 [M]. 21st edition. Washington, D. C.: APHA /AWWA /WEF, 2005: 104-127.
- [13] WACHTMEISTER A, KUBA T, van LOOSDRECHT M C M, et al. A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. Water Research, 1997, 31(3): 471-478.
- [14] 张自杰,林荣忱,金儒霖. 排水工程[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 306-315.
- [15] KUGLEMAN I J, SPECTOR M, HARVILLA A, et al. Aerobic denitrification in activated sludge [J]. Journal Environment Engineering, 1991, 117(2): 312-318.
- [16] TONKOVIC Z. Energetic of enhanced biological phosphorus and nitrogen removal processes [J]. Water Science Technology, 1998, 38(1): 177-184.
- [17] LITTLETON H X, DAIGGER G T, STROM P F, et al. Evaluation of autotrophic denitrification, heterotrophic nitrification, and PAOs in full scale simultaneous biological nutrient removal systems [J]. Water Science Technology, 2002, 46(1/2): 305-312.
- (责任编辑 张 蕾)