研究论文

流量分配比对改良 A/O 分段进水脱氮除磷特性的影响

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重点实验室，北京 100124）

摘要：采用改良 A/O 分段进水工艺处理我国南方低浓度、低碳氮比城市生活污水。在进水 COD/TN 为 5.16，HRT 为 8.7 h，SRT 为 15 d，MLSS 为 5.66 g·L^{-1}，污泥回流比为 75%，厌氧/缺氧/好氧体积比为 4∶8∶10 条件下，通过设置 6 种不同进水流量分配比，控制各好氧段 DO 为 1～1.5 mg·L^{-1}，经过 150 d 的连续运行，得到系统最佳流量分配比为 20%∶35%∶35%∶10%；在此工况下 COD、氨氮、总氮、总磷出水水质分别为 33.05 mg·L^{-1}、0.58 mg·L^{-1}、9.26 mg·L^{-1}、0.46 mg·L^{-1}，出水优于国家 GB 18918—2002 一级 A 排放标准。原水 COD 绝大部分作为厌氧释磷和反硝化脱氮所需碳源，系统对碳源有效利用率达 74%；DO 和 ORP 的协同控制可以作为系统厌氧放磷段的控制参数；同时亦可作为缺氧段反硝化完成和好氧段硝化完成的指示性参数。

关键词：改良 A/O 分段进水；脱氮除磷；低浓度废水；进水流量分配比；过程控制策略
DOI：10.3969/j.issn.0438-1157.2012.04.036
中图分类号：X 703.1　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0438－1157（2012）04－1249－09

Effect of inflow distribution ratio on N and P removal in modified A/O step-feed process

CAO Guihua，WANG Shuying，PENG Yongzhen，MIAO Zhijia
(*Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering*, *Beijing University of Technology*, *Beijing* 100124, *China*)

Abstract: Concentration of pollutants especially influent C/N in municipal wastewater is higher in the northern China than in the southern China. Therefore, it is difficult to keep efficient and stable removal of nitrogen and phosphorus by using conventional biological treatment processes because of the limitations and typical water quality in the southern China. In this study, a modified A/O step-feed process was operated at lab-scale to deal with the weak urban sewage and to remove simultaneously biological nitrogen (N) and phosphorus (P). Under the controlled conditions: influent COD/TN 5.16, HRT 8.7 h, SRT 15 d, MLSS 5.66 g·L^{-1}, sludge reflux ratio 75%, the volume ratio of anaerobic/anoxic/aerobic 4∶8∶10, DO 1.0—1.5 mg·L^{-1} in three aerobic zones, continuous operation with six inflow distribution ratio 150 d, the optimal flow distribution ratio obtained was 20%∶35%∶35%∶10%, and the values of COD, ammonia nitrogen, total nitrogen, total phosphorus in effluent were 33.05 mg·L^{-1}, 0.58 mg·L^{-1}, 9.26 mg·L^{-1} and 0.46 mg·L^{-1}, respectively. These values were up to Grade A discharging standard

2011－08－08 收到初稿，2011－10－12 收到修改稿。
联系人：王淑莹。第一作者：曹贵华（1983—），男，博士研究生。
基金项目："十一五"国家科技支撑计划重点项目(2009BAC57B01)。

Received date: 2011－08－08.
Corresponding author: Prof. WANG Shuying, wsy@bjut.edu.cn
Foundation item: supported by the National Key Technologies R&D Program of China during the Eleventh Five-year Plan Period (2009BAC57B01).

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

of pollutants for municipal wastewater treatment plant (WWTP) (GB 18918—2002). The majority of COD in raw water was used as carbon source of anaerobic phosphorus release and denitrification processes, and more than 74% of carbon sources was utilized effectively. At the same time, the experiment also found that collaborative control of DO and ORP are not only useful for anaerobic phosphorus release but also for anoxic denitrification and aerobic nitrification.

Key words: modified A/O step-feed process; nitrogen and phosphorus removal; weak wastewater; inflow distribution ratio; process control strategy

引 言

我国城市污水污染物浓度总体呈现为北方浓度高、南方浓度低的特征；尤其是南方污水进水碳氮比（COD/TN）相比北方而言更低，进水碳氮比一般在 4～6。针对低浓度、低碳氮比城市污水，传统生物处理工艺由于自身工艺限制[1]以及进水碳源的缺乏很难达到氮磷的高效、稳定去除。因此，处理此类污水的关键在于通过缩短水力停留时间（HRT）提高进水负荷，同时提高对进水碳源的合理有效利用率，使其尽可能多地作为反硝化脱氮以及厌氧释磷所需碳源。分段进水工艺具有碳源利用率高、氮磷去除率高和经济稳定的特点[2-4]，国内外学者分别从工艺设计参数及运行影响因素[5-12]、过程控制[13-18]、数学模型模拟[10,19]等方面对分段进水工艺已进行了较深入研究，但利用分段进水工艺处理我国南方低浓度、低碳源城市污水或类似污水达同步脱氮除磷目的在国内外尚没有相应的研究。

本研究基于以上背景，在课题组前期研究的改良 UCT 分段进水工艺[4]基础上，通过增加前置预缺氧反硝化段和好氧生物膜填料，同时取消第一缺氧段至厌氧段的内循环，形成改良 A/O 分段进水脱氮除磷工艺（modified anoxic/oxic step-feed process，MSF process）。以此处理我国南方低浓度污水，通过控制合理的进水流量分配比，考察其脱氮除磷效果；并对系统过程样进行分析，考察系统各段主要功能、机理以及对进水碳源的有效利用率。

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行程序

改良 A/O 分段进水脱氮除磷系统由原水箱、改良型多段 A/O 反应器、二沉池三部分顺序连接组成，试验装置如图 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，均分为 22 个格室，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。二沉池为竖流式，

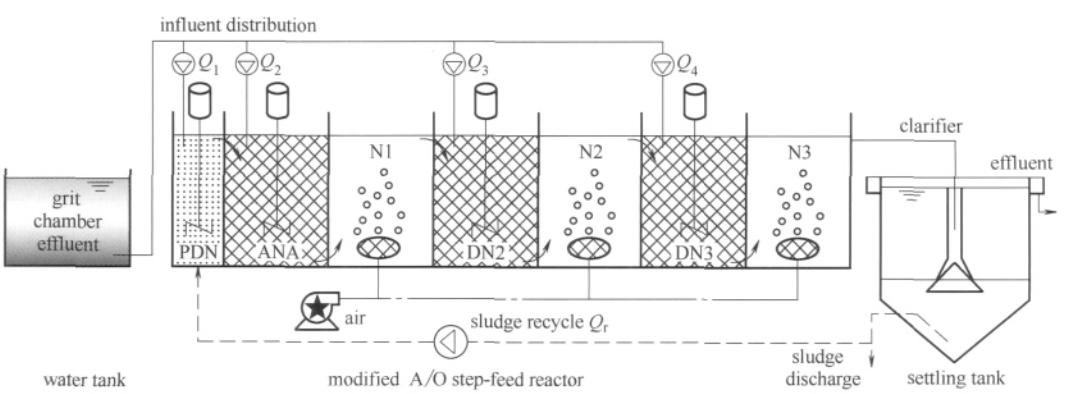

图 1 改良 A/O 分段进水脱氮除磷系统

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

PDN—pre-anoxic zone; ANA—anaerobic zone; N1—the first oxic zone; N2—the second oxic zone; N3—the third oxic zone; DN2—the second anoxic zone; DN3—the third anoxic zone

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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，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　接种污泥与试验用水

改良 A/O 分段进水脱氮除磷系统接种污泥取江苏省江都清源污水处理厂 Orbal 氧化沟（40000 $m^3 \cdot d^{-1}$）内沟的活性污泥进行自然驯化，该污水处理厂进水中氮以生物法去除，磷通过化学法去除。三周后系统污泥驯化完成，氨氮去除率达 80%以上，二沉池出水悬浮物（SS）小于 20 $mg \cdot L^{-1}$，系统达到稳定。

试验用水取自江苏省江都清源污水处理厂旋流式沉砂池出水，试验连续运行 150 d，试验期间进水水质见表 1。

表 1　试验期间的进水水质

Table 1　Influent characteristics

Item	Range	Average
COD/$mg \cdot L^{-1}$	89.22—243.1	160.29
BOD_5/$mg \cdot L^{-1}$	28.28—92.86	54.50
NH_4^+-N/$mg \cdot L^{-1}$	21.12—40.21	30.23
NO_2^--N/$mg \cdot L^{-1}$	0.00—0.49	0.07
NO_3^--N/$mg \cdot L^{-1}$	0.00—1.89	0.55
TN/$mg \cdot L^{-1}$	22.77—41.94	31.73
TP/$mg \cdot L^{-1}$	2.18—6.65	3.47
C/N(COD/TN)	2.18—7.80	5.16
C/P(COD/TP)	21.75—83.76	51.73
T/℃	18.1—22.1	19.79
pH	7.02—7.63	7.45

1.3　分析项目与方法

COD、BOD_5、NH_4^+-N、NO_2^--N、NO_3^--N、TN、TP 、MLSS、MLVSS 按照标准方法测定[20]，pH、DO 和温度 T 采用 WTW340i 测定仪（德国）测定。

1.4　试验条件与运行方案

改良 A/O 分段进水生化系统在室温（18～22℃）条件下运行。整个试验期间总进水流量 Q_{total} 不变，为 185 $L \cdot d^{-1}$，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，污泥回流比为 75%，MLSS 为 5.66 $g \cdot L^{-1}$，MLVSS 为 2.95 $g \cdot L^{-1}$。具体运行条件见表 2；厌氧、缺氧段 DO 控制在 0.1～0.15 $mg \cdot L^{-1}$，好氧段 DO 维持在 1～3.5 $mg \cdot L^{-1}$。厌氧/缺氧/好氧体积比为 4∶8∶10，其中预缺氧段体积为 7 L、厌氧段体积 12 L、好氧 1 段体积 12 L、缺氧 2 段体积 9 L、好氧 2 段体积 9 L、缺氧 3 段体积 9 L、好氧 3 段体积 9 L。

试验共分为 6 个运行工况，在其他运行条件不变的情况下，通过改变不同的进水流量分配比，考察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 2 所示。

1.5　系统碳源利用率的确定

系统各段 COD 物料衡算分析如图 2 所示，本文以第 α 段为对象进行有机物 COD 的物料衡算，对缺氧段和好氧段中 COD 进行物料计算，分别见式(1)、式(2)，第 1 段预缺氧段和厌氧区的物料平衡计算见式(3)、式(4)。

$$(Q_1 + Q_r + \sum_{\alpha=1}^{\alpha_{max}-1} Q_{\alpha+1}) S_{O_{\alpha-1}.COD} + Q_{\alpha+1} S_{0.COD} = (Q_1 + Q_r + \sum_{\alpha=1}^{\alpha_{max}} Q_{\alpha+1}) S_{(A\to O)_\alpha.COD} + \Delta S_{A_\alpha.COD} \quad (1)$$

表 2　试验运行工况及运行参数

Table 2　Experimental procedure and parameter for MSF process in steady state experiments

Run	Duration/d	Flow distribution ratio $Q_1 : Q_2 : Q_3 : Q_4$	Hydraulic retention time of each area(HRT)/h							Load rate×10^3/$kg \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$		
			PDN	ANA	N1	DN2	N2	DN3	N3	COD	TN	TP
1	0—22	30%∶20%∶30%∶20%	0.86	3.11	3.11	1.46	1.46	1.17	1.17	450.5	79.3	8.3
2	23—44	20%∶20%∶30%∶30%	1.30	3.89	3.89	1.67	1.67	1.17	1.17	427.8	79.8	10.6
3	45—70	30%∶30%∶20%∶20%	0.86	2.59	2.59	1.46	1.46	1.17	1.17	409.0	71.4	9.5
4	71—96	20%∶30%∶30%∶20%	1.30	3.11	3.11	1.46	1.46	1.17	1.17	396.4	79.5	10.6
5	97—123	25%∶25%∶25%∶25%	1.04	3.11	3.11	1.56	1.56	1.17	1.17	400.7	75.8	7.8
6	124—150	20%∶35%∶35%∶10%	1.30	2.83	2.83	1.30	1.30	1.17	1.17	397.9	80.1	7.6

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

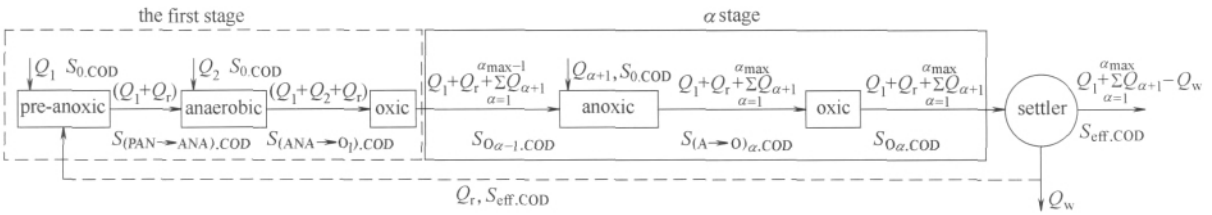

图 2 改良 A/O 分段进水工艺 COD 平衡

Fig. 2 COD mass balance of modified A/O step feed process

$$(Q_1+Q_r+\sum_{\alpha=1}^{\alpha_{max}}Q_{\alpha+1})S_{(A\to O)_\alpha.COD}=$$

$$(Q_1+Q_r+\sum_{\alpha=1}^{\alpha_{max}}Q_{\alpha+1})S_{O_\alpha.COD}+\Delta S_{O_\alpha.COD} \tag{2}$$

$$Q_1S_{0.COD}+Q_rS_{eff.COD}=$$

$$(Q_1+Q_r)S_{(PAN\to ANA).COD}+\Delta S_{PAN.COD} \tag{3}$$

$$(Q_1+Q_r)S_{(PAN\to ANA).COD}+Q_2S_{0.COD}=$$

$$(Q_1+Q_2+Q_r)S_{(ANA\to O_1).COD}+\Delta S_{ANA.COD} \tag{4}$$

因此，碳源有效利用量

$$\Delta S_{COD.use}=$$

$$\sum_{\alpha=1}^{\alpha_{max}}\Delta S_{A_\alpha.COD}+\Delta S_{PAN.COD}+\Delta S_{ANA.COD} \tag{5}$$

式中 $S_{O_\alpha.COD}$、$S_{(A\to O)_\alpha.COD}$ 分别表示第 α 段好氧区出水 COD 浓度、从缺氧区进入好氧区的 COD 浓度，mg·L^{-1}；$S_{(PAN\to ANA).COD}$、$S_{(ANA\to O_1).COD}$ 分别表示从第 1 段预缺氧区进入厌氧区的 COD 浓度以及从厌氧区进入好氧区的 COD 浓度，mg·L^{-1}；$\Delta S_{PAN.COD}$、$\Delta S_{ANA.COD}$ 分别表示第 1 段预缺氧区和厌氧区碳源被反硝化脱氮以及厌氧释磷的利用量，g·d^{-1}；$\Delta S_{A_\alpha.COD}$、$\Delta S_{O_\alpha.COD}$ 分别表示第 α 段缺氧区反硝化利用 COD 量和好氧区 COD 被好氧降解量，g·d^{-1}。

2 结果与讨论

2.1 不同阶段系统对 COD 的去除特性

本试验各运行模式下改良 A/O 分段进水脱氮除磷系统对 COD 的去除效果见图 3。可知，试验期间进水 COD 浓度波动较大，在 89.22～243.10 mg·L^{-1}之间变化，平均为 160 mg·L^{-1}左右，各工况下 98%的出水 COD 均在 50 mg·L^{-1}以下，各工况下出水 COD 浓度分别为 32.74 mg·L^{-1}、33.71 mg·L^{-1}、31.39 mg·L^{-1}、30.11 mg·L^{-1}、34.74 mg·L^{-1}、33.05 mg·L^{-1}，去除率分别为 81.92%、81.42%、79.75%、80.74%、77.58%、78.90%；进水流量分配比对 COD 去除效果影响甚微，出水可达国家 GB 18918—2002 一级 A 排放标准，显示出系统对 COD 的高效稳定去除。

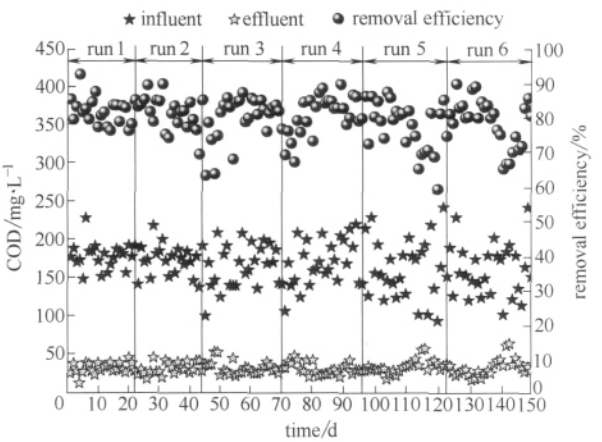

图 3 各工况下系统对 COD 去除效果

Fig. 3 COD removal efficiency of system under different operational conditions

表 3 为不同运行工况下 COD 在反应器各段的沿程变化规律以及碳源利用率情况。可以看出，COD 在反应器各段变化不大，维持在一个较低的水平。分析认为：（1）原水 COD 被分段进入系统，回流污泥对其产生稀释作用，并且稀释作用在反应器中发生了延时，导致在每一进水段 COD 几乎没有太大的变化；（2）COD 在缺氧和厌氧段被充分利用。结合图 1 和表 3 可知，由于原水分段进入预缺氧、厌氧、缺氧 2 和缺氧 3 四段，在这四段 COD 并没有显示很大的变化，说明系统 COD 大部分是在缺氧段和厌氧段被有效利用，如表 3 所示，各工况下碳源在缺氧段和厌氧段有效利用率分别为 68%、61%、76%、77%、72%、74%；而 COD 在好氧段只有少部分被降解，分别为 19%、25%、9%、9%、16%、10%。因此，好氧段主要完成氨氮硝化和磷的吸收，而第一好氧段硝化液直接进入第二缺氧段，与进入该段原水中碳源进行反硝化脱氮，使得碳源最大程度被用作反硝化脱氮，后续好氧段和缺氧段功能相同。并且缺氧段和厌氧段对

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　各工况下 COD 沿程变化规律及利用率分析

Table 3　COD concentration and utilization in different stage under different operational conditions

Item		INF	The first stage			The second stage		The third stage		EFF
			PDN	ANA	N1	DN2	N2	DN3	N3	
run 1	influent flow/L · d^{-1}	173.80	55.50	37.00		55.50		37.00		
	COD/mg · L^{-1}		47.77	44.19	27.27	24.50	16.92	18.29	17.60	17.82
	ΔS_{COD}/g · d^{-1}		2.15	5.49	3.91	8.93	2.18	5.36	0.22	−0.07
run 2	influent flow/L · d^{-1}	185.10	37.00	37.00		55.50		55.50		
	COD/mg · L^{-1}		37.09	42.05	32.87	46.34	30.76	34.27	27.80	27.27
	ΔS_{COD}/g · d^{-1}		4.11	4.43	1.95	4.83	4.18	7.43	2.09	0.17
run 3	influent flow/L · d^{-1}	178.70	55.50	55.50		37.00		37.00		
	COD/mg · L^{-1}		32.86	34.98	27.27	30.06	23.80	25.19	25.19	27.97
	ΔS_{COD}/g · d^{-1}		7.42	7.56	1.93	4.80	1.80	5.27	0.00	−0.90
run 4	influent flow/L · d^{-1}	175.70	37.00	55.50		55.50		37.00		
	COD/mg · L^{-1}		25.19	27.97	21.04	24.50	23.11	25.64	23.80	23.04
	ΔS_{COD}/g · d^{-1}		4.99	7.71	1.60	7.59	0.40	4.83	0.59	0.25
run 5	influent flow/L · d^{-1}	169.40	46.25	46.25		46.25		46.25		
	COD/mg · L^{-1}		32.86	34.98	27.27	30.06	23.80	25.19	23.11	21.04
	ΔS_{COD}/g · d^{-1}		4.67	5.82	1.78	5.80	1.74	6.27	0.67	0.67
run 6	influent flow/L · d^{-1}	171.20	37.00	64.75		64.75		18.50		
	COD/mg · L^{-1}		29.92	33.21	28.21	30.63	26.87	28.37	27.67	25.88
	ΔS_{COD}/g · d^{-1}		4.36	8.36	1.21	8.52	1.15	2.19	0.22	0.58

COD 的高利用率使得进入各好氧段 COD 浓度很低，这有利于自养菌大量富集。

2.2　不同阶段系统对氮的去除特性

系统运行的 6 个阶段，对氨氮和总氮整体去除性能见图 4，可以看出试验期间进水 TN 浓度为 22.77～41.94 mg · L^{-1}，平均为 31.73 mg · L^{-1} 左右，各工况下 97.3% 的出水 NH_3 均在 5 mg · L^{-1} 以下，81.3% 的出水 TN 均在 15 mg · L^{-1} 以下；6 个工况下对 NH_3 去除一直保持一个较高水平，出水 NH_3 浓度分别为 1.23 mg · L^{-1}、3.72 mg · L^{-1}、0.20 mg · L^{-1}、0.39 mg · L^{-1}、1.15 mg · L^{-1}、0.58 mg · L^{-1}，去除率分别为 96.28%、88.44%、99.31%、98.65%、96.52%、98.31%；6 个工况下出水 TN 浓度分别为 12.39 mg · L^{-1}、15.60 mg · L^{-1}、13.06 mg · L^{-1}、12.48 mg · L^{-1}、11.99 mg · L^{-1}、9.26 mg · L^{-1}，去除率分别为 61.46%、51.67%、55.12%、57.23%、61.48%、70.24%；从图 4 可以看出进水流量分配比对 NH_3 去除效果影响不大，对于 TN 去除率有较大影响，工况 6 的 TN 去除率比工况 2 提高近 20%；除工况 2 外，其他 5 种工况氨氮和总氮出水均可达国家 GB 18918—2002 一级 A 排放标准。

不同运行工况下 NH_4^+、NO_3^- 在反应器各段的沿程变化规律见图 5。结合图 4 和图 5 可以看出，

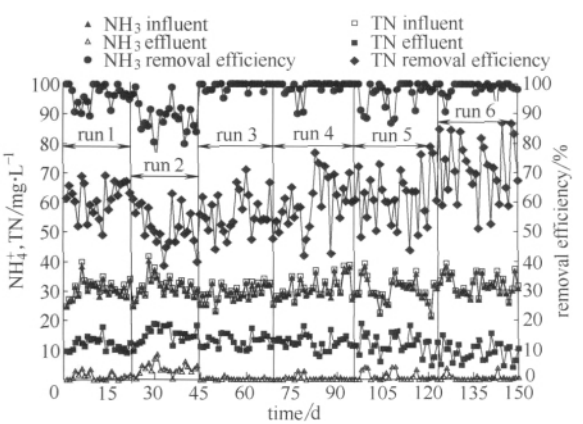

图 4　各工况下系统对 NH_3 和 TN 去除效果

Fig. 4　NH_3 and TN removal efficiency of system under different operational conditions

各工况下系统出水氨氮较低，均值为 1.21 mg · L^{-1}，说明系统整体硝化容量充足。而工况 2，由于提高第 3、4 段进水分配比，导致该两端氨氮负荷超过其硝化容量，使得工况 2 出水氨氮浓度达到 3.72 mg · L^{-1}。图 5 显示各工况下 NH_4^+ 在厌氧段、缺氧段出现升高主要由于有原水的进入，好氧段降低则因为硝化细菌将氨氮氧化为硝态氮，符合传统 A/O 工艺对于氨氮降解的特点。试验中还发现系统好氧 1 段和好氧 2 段并没有实现对氨氮的完全去除，分析认为好氧 1 段和好氧 2 段总体 HRT 不足，导致氨氮负荷超过其硝化容量，而好氧 3 段的设置可以弥补上述硝化容量的不足，积累的氨氮在

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

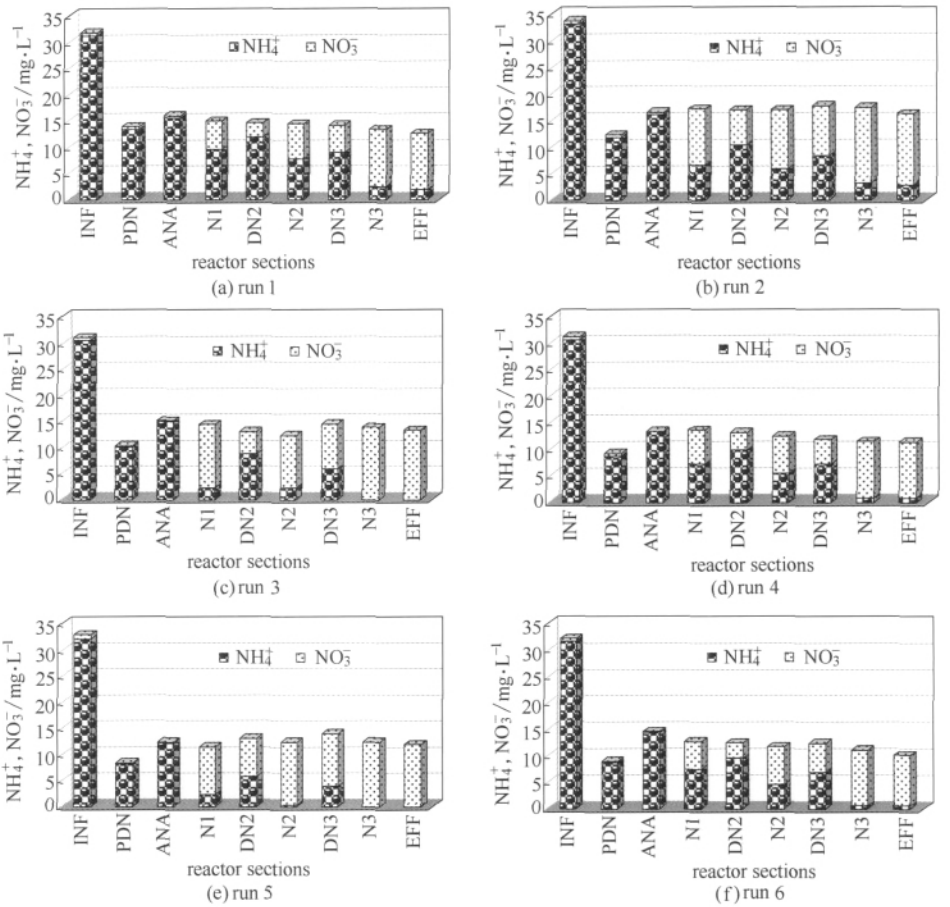

图 5 各工况下 NH_4^+、NO_3^- 沿程变化规律

Fig. 5 NH_4^+, NO_3^- concentration in different stage under different operational conditions

好氧 3 段被去除。同时氨氮在系统各段的浓度不高，6 个工况下氨氮浓度最高出现在厌氧区，一般低于 16 mg·L^{-1}，分析认为：一是分段进水缓解了集中进水所带来的高负荷冲击，将高负荷平分到整个系统流程中；二是因为系统回流污泥的稀释作用。

从图 5 还看出，各工况下 NO_3^- 在厌氧段、缺氧段降低，主要由于发生反硝化脱氮以及部分反硝化除磷作用引起（反硝化除磷现象从图 7 可以初步判断）。并且系统预缺氧段的设置几乎完全降解回流污泥中携带的硝态氮，试验期间预缺氧段硝态氮平均浓度为 0.58 mg·L^{-1}，因此通过预缺氧段的设置可以解决传统单泥脱氮除磷系统中因为回流污泥中硝态氮的存在而抑制除磷效果的矛盾。

2.3 不同阶段系统对磷的去除特性

系统对 TP 的去除效果如图 6 所示。不同进水流量分配比对 TP 去除效果影响较大，6 个工况下出水 TP 浓度分别为 0.43 mg·L^{-1}、0.79 mg·L^{-1}、0.35 mg·L^{-1}、0.26 mg·L^{-1}、0.63 mg·L^{-1}、0.43 mg·L^{-1}，去除率分别为 89.01%、79.56%、88.95%、91.69%、80.19%、86.11%；试验期间 60% 的 TP 出水低于 0.5 mg·L^{-1}，而且 TP 去除率随第一、第二段进水量之和增加而

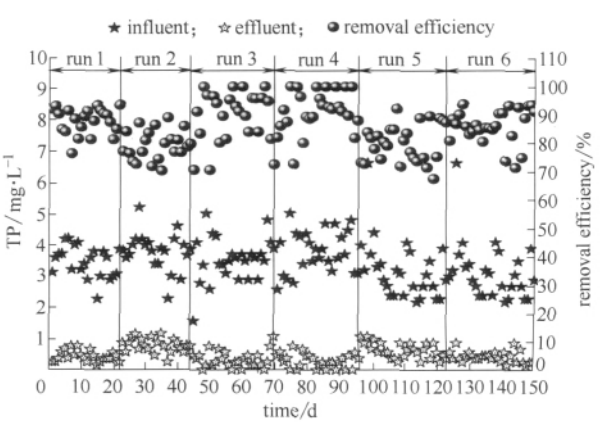

图 6 各工况下系统对 TP 去除效果

Fig. 6 TP removal efficiency of system under different operational conditions

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

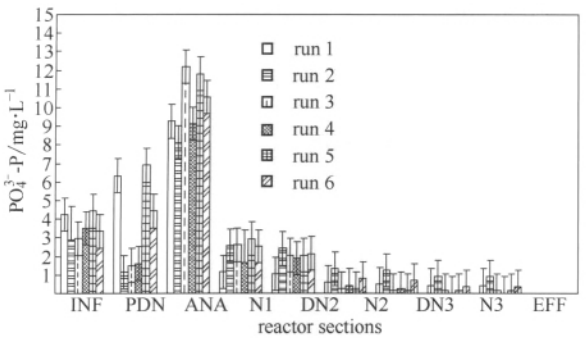

图 7　各工况下 PO_4^{3-}-P 沿程变化规律

Fig. 7　PO_4^{3-}-P concentration in different stage under different operational conditions

增加。

从磷酸盐在系统内的沿程变化规律（图 7）可知，聚磷菌释磷主要发生在厌氧段，第一好氧段为吸磷主要场所。在预缺氧段，如果进水碳氮比较高，当该段回流污泥中携带的硝态氮被反硝化完后，会发生释磷现象；如果进水碳氮比不高，系统中存在的反硝化聚磷菌可能会利用回流污泥携带的硝态氮作为电子供体，在降解硝态氮的同时完成吸磷，同时还存在回流污泥的稀释作用，则出现预缺氧段磷酸盐的降低。结合图 5 可知，在厌氧段由于硝态氮很少，聚磷菌充分利用进入厌氧段原水中的碳源合成 PHB，同时释放体内的磷酸盐，导致厌氧段发生了聚磷菌释磷现象，释磷量最大达到 415%左右，平均释磷量约为 300%，且释磷量随第一、第二段进水量之和增加而增加，TP 去除率也随之增高，这进一步证实了聚磷菌厌氧释磷量越大，好氧吸磷量也越大。系统的厌氧释磷量与王伟等[21]、Ge 等[4]实验中所提到的 350%和 497%最大释磷量相差不大。在好氧段出现正磷的大量减少，主要是由于聚磷菌好氧吸磷作用。在缺氧 2 段至好氧 3 段正磷总体呈现下降趋势，分析认为这 4 段区域发生了聚磷菌的进一步吸磷以及可能存在的反硝化除磷菌反硝化除磷行为。系统中反硝化除磷现象以及反硝化除磷细菌所占的比例尚待进一步研究。

2.4　不同阶段系统各段 DO、ORP、pH 变化规律

不同进水流量分配比下系统各段的 DO、pH、ORP 的变化情况如图 8 所示。从图中可以看出 DO、pH、ORP 在各段有很好的相关性：DO 和 ORP 在厌氧段、缺氧段降低，好氧段升高，pH 则刚好相反。DO 在缺氧段和厌氧段维持在 0.08～0.14 mg·L^{-1}，好氧段为 1.06～3.50 mg·L^{-1}；ORP 在厌氧段维持在－371～－448 mV，缺氧段为－200～－306 mV，好氧段为－55～6mV；pH 在缺氧段和厌氧段维持在 7.55～7.76，好氧段为 7.61～7.75。

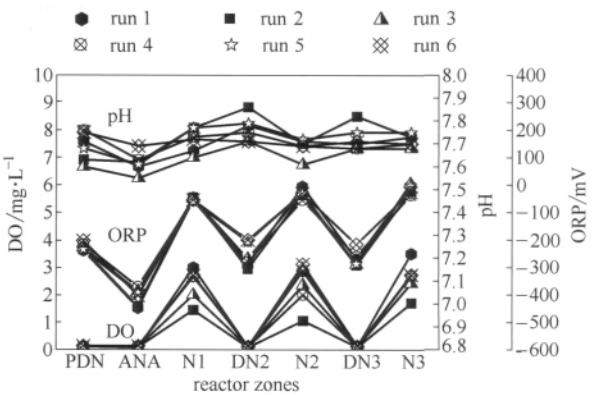

图 8　不同工况下系统各段 DO、pH、ORP 变化情况

Fig. 8　Variations of DO, pH and ORP under different inflow distribution ratios

结合图 5 和图 7 分析认为：在预缺氧段由于反硝化脱氮作用以及部分反硝化除磷效果的发生，反硝化和缺氧吸磷都产生碱度，使得 pH 上升；而环境中的 pH 对 ORP 也会产生影响，pH 低时 ORP 也低，反之 pH 高时 ORP 也高；在缺氧环境下，大多数的生物化学反应主要是反硝化和缺氧吸磷，伴随着污泥回流使得大量的硝态氮回流到缺氧区，预缺氧段 ORP 相对于进水出现上升。在厌氧段主要发生聚磷菌对有机物的摄取以及厌氧释磷，磷释放和有机物降解越多，DO、ORP 和 pH 值下降越多。在好氧 1 段主要完成正磷的吸收以及氨氮的硝化造成 DO、pH、ORP 上升，好氧吸磷使得 pH 上升，而反硝化脱氮使得 pH 下降，说明本段好氧吸磷产生的碱度超过硝化消耗的碱度，总体显示为 pH 上升；这进一步证实在好氧 1 段主要发生好氧吸磷，氨氮的硝化则进行不完全。在缺氧 2 段和缺氧 3 段主要由于反硝化脱氮消耗碱度，导致 pH 有所上升；而 ORP 下降可能是由于缺氧段硝态氮已经被降解很多造成氧化态高的离子减少，使得 ORP 下降。在好氧 2 段和好氧 3 段主要发生氨氮的氧化、聚磷菌进一步吸磷以及部分有机物的氧化分解，并且氨氮近乎完全硝化所消耗的碱度远远超过聚磷菌少量吸磷所产生的碱度，造成 pH 的下降，这与 Wang 等[22]的好氧段 pH 继续下降相符合；而 ORP 上升可能是由于好氧曝气造成氧化态

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

高的离子增加所致。

因此，DO 和 ORP 的协同控制可以作为改良 A/O 分段进水脱氮除磷系统厌氧放磷段的控制参数；同时亦可作为缺氧段反硝化完成和好氧段硝化完成的指示性参数。

3 结 论

（1）采用改良 A/O 分段进水脱氮除磷工艺处理我国南方低浓度城市生活废水，在进水 COD/TN 为 5.16，HRT 为 8.7 h，SRT 为 15 d，MLSS 为 5.66 g·L^{-1}，污泥回流比为 75%，厌氧/缺氧/好氧体积比为 4∶8∶10 条件下，通过调整四段进水流量分配比为 20%∶35%∶35%∶10%，得到系统最佳运行参数。在此工况下 COD、氨氮、总氮、总磷出水水质分别为 33.05 mg·L^{-1}、0.58 mg·L^{-1}、9.26 mg·L^{-1}、0.46 mg·L^{-1}，去除率分别为 78.90%、98.31%、70.24%、86.11%，出水优于国家 GB 18918—2002 一级 A 排放标准。

（2）DO 和 ORP 的协同控制可以作为系统厌氧放磷段的控制参数；同时亦可作为缺氧段反硝化完成和好氧段硝化完成的指示性参数。在进水流量分配比为 20%∶35%∶35%∶10%工况下，控制各好氧段 DO 为 1.0～1.5 mg·L^{-1}，厌氧段 ORP 在－300～－350 mV、缺氧段 ORP 在－200～－250 mV、好氧段 ORP 在 0～10 mV，可以使聚磷菌释磷量、氨氮和硝酸盐的去除维持在最佳范围内。

（3）原水分段进入系统预缺氧、厌氧、缺氧 1 和缺氧 2 四段，进水 COD 绝大部分在厌氧段和缺氧段被作为聚磷菌厌氧释磷和反硝化脱氮所需碳源，最优工况下碳源有效利用率达 74%，占 COD 去除率的 88%。

本文工艺尤其适合 A^2/O 工艺的升级改造，不需增加任何构筑物，只需将好氧段分格辅以智能化的控制手段，使缺氧好氧工艺交替运行即可实现。因此，无论是新建污水处理厂还是老厂的升级改造，都具有简单、易行、高效的竞争优势。

References

[1] Cao Guihua（曹贵华），Huang Yong（黄勇），Pan Yang（潘扬）. The problems and the solutions of conventional biological nitrogen and phosphorus removal processes [J]. *Technology of Water Treatment*（水处理技术），2009，25（3）：102-106

[2] Zhu Guibing，Peng Yongzhen，*et al*. Simultaneous nitrification and denitrification in step-feed biological nitrogen removal process [J]. *Chemical Engineering Journal*，2007，19：1043-1048

[3] Wang Wei，Peng Yongzhen，Wang Shuying. Enhanced biological nutrients removal in modified step-feed anaerobic/anoxic/oxic（SFA^2/O）process [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*，2009，17（5）：840-848

[4] Ge Shijian，Peng Yongzhen，Wang Shuying，*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

[5] Zhu G B，Peng Y Z，Zhai L M，*et al*. Performance and optimization of biological nitrogen removal process enhanced by anoxic/oxic step feeding [J]. *Biochemical Engineering Journal*. 2009，43（3）：280-287

[6] Zhu G B，Peng Y Z，Wang S Y，*et al*. Effect of influent flow rate distribution on the performance of step-feed biological nitrogen removal process [J]. *Chemical Engineering Journal*，2007，131（1/2/3）：319-328

[7] Wang Wei（王伟），Peng Yongzhen（彭永臻），*et al*. The effect of dissolved oxygen on the lab-scale step-feed biological nitrogen removal process [J]. *China Environmental Science*（中国环境科学），2006，26（3）：293-297

[8] Wang Wei（王伟），Wang Shuying（王淑莹），*et al*. Effects of influent flow distribution ratio on nitrogen removal in step-feed A/O process [J]. *Environmental Science*（环境科学），2009，3（1）：89-91

[9] Fujii S. Theoretical analysis on nitrogen removal of the step-feed anoxic-oxic activated sludge process and its application for the optimal operation [J]. *Water Science and Technology*，1996，34（1/2）：459-466

[10] Tang C C，Kuo J，Weiss J S. Maximum nitrogen removal in the step-feed activated sludge process [J]. *Water Environment Research*，2007，79（4）：367-374

[11] Johnson B R，Goodwin S，Daigger G T，*et al*. A comparison between the theory and reality of full-scale step-feed nutrient removal systems [J]. *Water Science and Technology*，2005，52（10/11）：587-596

[12] Liang Hanwen，Gao Min，Liu Junxin，*et al*. A novel integrated step-feed biofilm process for the treatment of decentralized domestic wastewater in rural areas of China [J]. *Journal of Environmental Sciences*，2010，22（3）：321-327

[13] Zhu Guibing，Peng Yongzhen，*et al*. Automatic control strategy for step feed biological nitrogen removal process [J]. *Journal of Environmental Science*，2005，17（3）：455-457

[14] Zhu Guibing，Peng Yongzhen，*et al*. Optimization of anoxic/oxic step feeding activated sludge process with fuzzy control model for improving nitrogen removal [J]. *Chemical Engineering Journal*，2009，151（1/2/3）：195-201

[15] Zhu G B，Peng Y Z，Wang S Y. Hydraulic method of controlling solids retention time in step-feed biological nitrogen removal process [J]. *Environmental Engineering*

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Science，2007，24（8）：1112-1121

[16] Wang Wei（王伟），Wang Shuying（王淑莹），*et al*. Establishment and application of influent flow distribution expert system in step-feed A/O process [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*（*China*）（化工学报），2008，59（10）：2608-2615

[17] Wang Wei（王伟），Wang Shuying（王淑莹），*et al*. Distribution methods of influent flows and volume in multi-stages A/O process and its optimization [J]. *Journal of Beijing University of Technology*（北京工业大学学报），2009，35（2）：7-13

[18] Peng Y Z，Zhu G B，Wang S Y. Use of C/N ratio as fuzzy control parameter for improved nitrogen removal in step-feed biological nitrogen removal process [J]. *Environmental Informatics Archives*，2004（2）：706-713

[19] Funamizu N，Yamamoto S，Kitagawa Y，*et al*. Simulation of the operational conditions of the full-scale municipal wastewater treatment plant to improve the performance of nutrient removal [J]. *Water Science and Technology*，1997，36（12）：9-18

[20] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [M]. 21st ed. Washington，DC：APHA/AWWA/WEF，2005

[21] Wang Wei（王伟），Peng Yongzhen（彭永臻），*et al*. Modified step-feed A/O biological nitrogen removal process for enhanced phosphorus removal [J]. *Environmental Science*（环境科学），2009，30（10）：2968-2974

[22] Wang X L，Peng Y Z，Wang S Y. Influence of wastewater composition on nitrogen and phosphorus removal and process control in A^2O process [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*，2006，28（6）：397-404

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net