

研究论文 分段进水脱氮除磷工艺中反硝化除磷的实现与维持

葛士建¹, 王淑莹¹, 曹旭¹, 马斌², 路聪聪¹, 彭永臻^{1,2}

¹ 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 100124;

² 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090

摘要: 以实际城市生活污水为处理对象, 应用改良 UCT 分段进水工艺研究反硝化除磷的实现途径与维持方法, 探讨工艺运行参数对反硝化除磷性能的影响, 并分析了强化缺氧吸磷对提高系统脱氮除磷效率的作用和稳定维持反硝化除磷的控制策略。结果表明, 通过 A/O 分段进水工艺向改良 UCT 分段进水工艺运行方式的转变, 可以成功富集反硝化聚磷菌, 最高比例达 39.2%, 污泥缺氧吸磷速率为 $3.19 \sim 4.48 \text{ mg P} \cdot (\text{g VSS})^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。缺氧/好氧吸磷速率和磷去除率随厌氧池体积的增加而增加, 最佳体积分配为 34/102/204 L (1/3/6)。控制污泥回流和内循环分别为 100% 和 75% 时, 能合理保证厌氧池的厌氧环境 (ORP 维持在 $-400 \sim -150 \text{ mV}$), 以及缺氧池合适的污泥浓度和硝酸盐浓度 ($1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 强化反硝化吸磷性能。另外, 建立相应的控制策略: (1) 根据厌氧池 ORP 值控制内循环; (2) 通过缺氧出水硝酸盐浓度控制污泥回流; (3) 通过厌氧释磷量和出水 COD 浓度来调节厌氧/缺氧/好氧池体积分配; (4) 根据进水碳氮磷比调整各段进水流量分配比。

关键词: 分段进水; 脱氮除磷; 开普敦工艺; 反硝化除磷

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2011.09.034

中图分类号: X 703.1

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2011) 09-2615-08

Achievement and maintenance of denitrifying phosphorus removal in step feed nutrient removal process

GE Shijian¹, WANG Shuying¹, CAO Xu¹, MA Bin², LU Congcong¹, PENG Yongzhen^{1,2}

¹ Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; ² State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China

Abstract: Denitrifying phosphorus removal was stably achieved with a biological step feed nutrient removal process from real municipal wastewater. The effects of operational parameters on the denitrifying phosphorus removal and the improvement of nutrient removal by intensifying anoxic phosphorus uptake as well as control strategies about maintenance of denitrifying phosphorus removal in the modified University of Cape Town (UCT) step feed process were discussed. The results indicated that denitrifying accumulating bacteria (DPAOs) could be successfully enriched with the maximum proportion and anoxic phosphorus uptake rate of 39.2% and $3.19 \sim 4.48 \text{ mg P} \cdot (\text{g VSS})^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ respectively, according to the process shift from the A/O model to the modified UCT model. Both anoxic and aerobic phosphorus uptake rates and phosphorus removal efficiency increased with the increase of anaerobic volumes, and the optimum

2010-12-23 收到初稿, 2011-03-10 收到修改稿。

联系人: 彭永臻。第一作者: 葛士建 (1987—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家“十一五”重大科技专项 (2008ZX07317-007-

105); “城市水资源与水环境国家重点实验室”开放基金项目 (QAK201006)。

Received date: 2010-12-23.

Corresponding author: Prof. PENG Yongzhen, pyz@bjut.edu.cn

Foundation item: supported by the National Key Science and Technology Special Projects (2008ZX07317-007-105) and State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment (QAK201006).

anaerobic/anoxic/oxic volume distribution was 34/102/204 L (1/3/6). When the sludge return ratio and internal recycle ratio were respectively set at 100% and 75%, it was beneficial to the achievement of true anaerobic environment in anaerobic zones with ORP of $-400 \sim -150$ mV and suitable mixed liquor suspended solids concentrations and nitrate $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in anoxic zones, all of which aided to enhance the denitrifying phosphorus removal performance. In addition, several control strategies were as well established as follows: (1) Control the internal recycle ratio by the value of ORP in anaerobic zones; (2) Adjust sludge return ratio according to nitrate in anoxic effluent; (3) Set the volumes ratios based on the anaerobic phosphorus release amounts and COD concentrations; (4) Regulate the influent distribution according to influent nutrient ratios.

Key words: step feed; nitrogen and phosphorus removal; UCT; denitrifying phosphorus removal

引 言

现代都市化进程及湖泊和缓流水体的富营养化现象加剧了水资源日益短缺的问题, 污水处理回用是缓解水资源紧缺的重要途径之一, 目前各国对于污水处理标准的要求越来越严格。现有的生物法活性污泥污水处理工艺, 如 A/O、 A^2 /O、UCT 等大多均不能满足国家城镇污水一级 A 排放标准的要求。而分段进水工艺由于采用原水分流方式和过程控制, 强化了厌氧缺氧微生物对原水碳源的有效利用, 相同原水水质条件下氮磷去除效果显著, 在国外已得到广泛的应用 (美国 Lander Street 和 Vancouver Westside 污水厂, 加拿大 Lethbridge 污水厂, 新西兰 Mangere 污水厂, 新加坡 Changi 污水厂和日本琵琶湖流域东北部净化中心)^[1]。

一般认为, 活性污泥系统存在一类聚磷菌, 它们在缺氧环境下能以硝酸盐或亚硝酸盐为电子受体, 过量摄取污水中的磷, 以聚磷的形式储存于体内, 这类微生物被称作反硝化聚磷菌 (DPAOs, denitrifying phosphorus accumulating organisms)^[2-3]。Kuba 等^[4-6]在实际污水处理厂的 UCT、

MUCT 和 Phoredox 工艺系统中发现 DPAOs 的存在, 而且通过调整和优化运行参数可大大提高反硝化除磷性能。研究表明, 强化 BNR 工艺反硝化除磷能力, 不但能减少碳源需求和曝气能耗, 还可提高氮磷去除效果。

本试验以实际城市生活污水为研究对象, 重点考察如何在改良 UCT 分段进水工艺中实现、强化与维持反硝化除磷性能。通过反硝化脱氮和缺氧吸磷过程的“一碳两用”, 强化分段进水工艺在处理碳源不足、低碳氮比生活污水时氮磷去除率高的优势。

1 材料与方 法

1.1 试验装置

改良 UCT 分段进水脱氮除磷工艺 (如图 1 所示) 为三段式结构, 第一段由厌氧池、缺氧池和好氧池组成, 第二段和第三段均由缺氧池和好氧池串联组合而成。主反应器有效容积 340 L, 有机玻璃材质, 尺寸 $50 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 125 \text{ cm}$ 。采用电磁式空气压缩机曝气, 以黏砂块为微孔曝气器, 转子流量计调节曝气量, 进水及污泥回流通过蠕动泵控制。

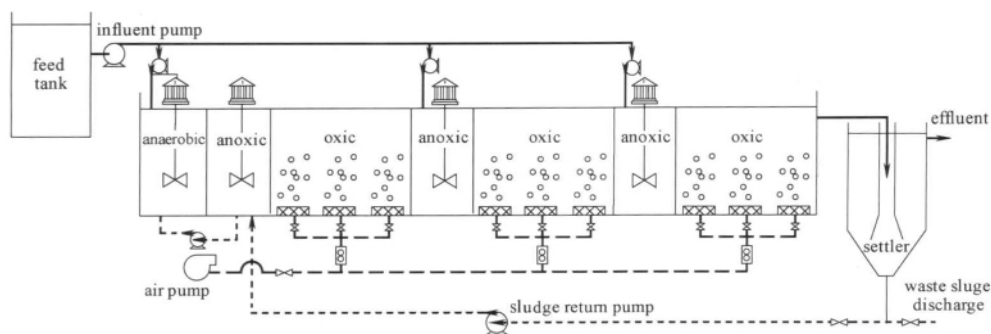


图 1 改良 UCT 分段进水生物脱氮除磷工艺中试试验装置示意图

表 1 污水水质参数

Table 1 Characteristics of influent wastewater

pH	COD/mg · L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg · L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N/mg · L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/mg · L ⁻¹	TN/mg · L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ -P/mg · L ⁻¹	TP/mg · L ⁻¹
7.4±0.4	308±172	51.0±18.8	0.07±0.32	0.91±1.39	52.9±17.1	3.92±5.49	6.43±6.22

竖流式二沉池上部沉淀区呈圆柱形，直径为 50 cm，污泥斗为截头倒锥体，倾角为 60°，总高度为 90 cm，容积为 88 L，采用中心进水、周边三角堰出水方式。控制系统由传感器、现场仪表、实时过程控制器和上位机组成。整个过程可通过上位机进行监视、操作与控制。

1.2 试验污水和接种污泥

试验在北京高碑店污水处理厂进行，以该厂初沉池出水为系统原水，水质特性参数见表 1。接种污泥取自二沉池回流污泥，为黄褐色污泥，沉降性好。接种后投加一定比例污水，闷曝 12 h，再次换水闷曝 2 d，待硝化活性恢复后采用分段进水工艺连续运行。

1.3 水质分析方法

水样首先经 0.45 μm 中速滤纸过滤，取滤出液按照标准方法测定 NH₄⁺-N，NO₂-N，NO₃-N，PO₄³⁻-P，COD，污泥浓度 MLSS 和挥发性污泥浓度 MLVSS 等指标^[7]，采用德国 WTW level-2 pH 仪和探头测定 pH 和温度，采用 WTW，pH/oxi340i 仪测定氧化还原电位值（ORP）和溶解氧（DO）。按照 Oehmen 的操作方法改良后进行 PHA 测定^[8]。采用 Agilent 6890N 型气相色谱以及 Agilent DB-1 型气相色谱柱测定。使用 3-羟基丁酸与 3-羟基戊酸混合物（95%：5%，Fluka，BuchsSG，Switzerland）为聚 β-羟基丁酸（PHB）和聚 β-羟基戊酸（PHV）的标准物质，2-羟基己酸（Sigma-Aldrich）为聚 β-羟基-甲基戊酸（PH2MV）的标准物质。

1.4 试验安排

试验分两个阶段：反硝化聚磷菌的富集培养阶段和影响因素研究阶段，具体安排见表 2。其他工艺运行参数为：进水流量分配比为 40%：30%：30%，水力停留时间 HRT 为 8 h，污泥龄 SRT 为 8 d，水温为 20~24℃。

2 结果与讨论

2.1 系统对各污染物去除性能

本课题组前期研究的 A/O 分段进水工艺主要

表 2 分段进水工艺运行试验安排

Table 2 Experiment approach of step feed process

Runs	Experimental approach
enrichment of DPAOs	(1)A/O step feed process (2)modified UCT step feed process
effects of operational parameters on denitrifying phosphorus removal	(1)anaerobic/anoxic/oxic volume ratios; 17/119/204 L;25.5/110.5/204 L;34/102/204 L;42.5/93.5/204 L (2) sludge return ratios; 25%; 50%; 75%;100%;125% (3) internal recycle ratios; 50%; 75%; 100%

围绕深度脱氮的运行优化及控制策略，对磷去除的关注较少。为综合考虑同步氮磷的高效去除，课题组提出了改良 UCT 同步深度脱氮除磷分段进水工艺，前期关于进水流量分配比和营养元素比等参数对工艺性能的研究表明^[9]，该工艺处理我国城市生活污水具有一定的竞争优势和推广应用价值。

本研究均在进水流量分配比为 40%：30%：30%，HRT 为 8 h，SRT 为 8 d 的条件下进行^[9]，进水属低 C/N 污水水质（C/N<6）。表 3 是不同厌氧/缺氧/好氧池容积比和内循环工况下的 COD、氮和磷去除情况，可知：（1）COD 去除性能稳定，几乎不受池体容积比和内回流比的影响，出水水质均小于 50 mg · L⁻¹，且 COD 主要被微生物在厌氧池和缺氧池中有效利用。（2）硝化性能显著，NH₄⁺-N 去除率高达 99%，出水 TN 为 8.01~11.2 mg · L⁻¹，去除率为 81.2%~86.4%。表明分段进水工艺处理低 C/N 生活污水可以实现深度脱氮的目标，满足国家城镇污水一级 A 排放标准。（3）厌氧/缺氧/好氧池容积比对磷的去除影响较大，PO₄³⁻-P 去除率随厌氧区容积的增大而提高，而在内回流比为 75%的工况下出水 PO₄³⁻-P 浓度最低 0.28 mg · L⁻¹，适宜聚磷菌的富集和生长，系统磷去除性能最佳。

2.2 反硝化除磷的实现途径分析

试验启动时采用 A/O 分段进水工艺，尽管尝试调整各种运行参数，但系统除磷效果欠佳，去除率仅为 50%~70%，进水水质特征或工艺本身设置是影响系统磷去除效果的因素。然而，出水 TN 浓

表 3 不同工况条件下各污染物的平均去除效果
Table 3 Mean removal efficiencies of several pollutants during different states

Parameter	Value	Item	COD	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN	PO ₄ ³⁻ -P
anaerobic/anoxic/oxic volume ratio	17/119/204 L	influent/mg · L ⁻¹	285	53. 5	0. 81	57. 1	5. 47
		effluent/mg · L ⁻¹	43. 6	0. 15	8. 61	10. 6	1. 29
		removal efficiency/%	84. 7	99. 7	—	81. 4	76. 4
	25. 5/110. 5/204 L	influent/mg · L ⁻¹	263	54. 1	0. 83	58. 3	5. 58
		effluent/mg · L ⁻¹	42. 4	0. 23	8. 12	10. 3	0. 93
		removal efficiency/%	83. 6	99. 6	—	82. 4	83. 2
	34/102/204 L	influent/mg · L ⁻¹	272	52. 8	0. 94	59. 6	5. 96
		effluent/mg · L ⁻¹	39. 2	0. 11	8. 52	11. 2	0. 27
		removal efficiency/%	85. 5	99. 8	—	81. 2	95. 5
	42. 5/93. 5/204 L	influent/mg · L ⁻¹	268	49. 3	0. 58	55. 8	6. 78
		effluent/mg · L ⁻¹	39. 7	0. 09	8. 94	9. 88	0. 34
		removal efficiency/%	85. 2	99. 8	—	82. 3	95. 1
sludge return ratio	50%	influent/mg · L ⁻¹	254	53. 2	1. 01	56. 8	5. 27
		effluent/mg · L ⁻¹	39. 3	0. 28	7. 52	9. 73	0. 49
		removal efficiency/%	84. 2	99. 5	—	82. 8	90. 8
	75%	influent/mg · L ⁻¹	242	54. 6	0. 62	58. 2	6. 67
		effluent/mg · L ⁻¹	36. 1	0. 20	6. 34	8. 29	0. 24
		removal efficiency/%	84. 9	99. 6	—	85. 6	96. 4
	100%	influent/mg · L ⁻¹	236	53. 8	0. 77	58. 8	5. 94
		effluent/mg · L ⁻¹	38. 8	0. 18	6. 35	8. 01	0. 19
		removal efficiency/%	83. 5	99. 7	—	86. 4	96. 8
	125%	influent/mg · L ⁻¹	259	51. 5	0. 49	58. 6	6. 48
		effluent/mg · L ⁻¹	37. 3	0. 26	8. 22	9. 43	0. 75
		removal efficiency/%	85. 6	99. 5	—	83. 9	88. 5
internal recycle ratio	50%	influent/mg · L ⁻¹	248	53. 7	0. 47	56. 2	5. 06
		effluent/mg · L ⁻¹	39. 5	0. 31	7. 49	9. 72	0. 52
		removal efficiency/%	84. 1	99. 4	—	82. 7	91. 2
	75%	influent/mg · L ⁻¹	239	55. 7	0. 68	58. 0	6. 73
		effluent/mg · L ⁻¹	36. 5	0. 23	6. 23	8. 32	0. 28
		removal efficiency/%	85. 0	99. 6	—	85. 5	95. 8
	100%	influent/mg · L ⁻¹	246	53. 3	0. 36	59. 3	6. 06
		effluent/mg · L ⁻¹	41. 3	0. 06	6. 35	8. 03	0. 68
		removal efficiency/%	83. 2	99. 9	—	86. 5	88. 8

度较低说明低 C/N 水质特点并不是去除氮磷营养元素的限制因素。因此，合理调整工艺布置结构，优化微生物的种群结构，富集 DPAOs，实现缺氧反硝化和吸磷过程的同步发生，不但可以提高出水水质，还可减少系统运行费用。厌氧/缺氧交替的运行方式有利于反硝化聚磷菌的富集^[10]，因此试验 2 个月调整后调整为改良 UCT 分段进水工艺。

图 2 显示了系统磷浓度和内碳源 PHA 的沿程变化，考虑到回流的稀释作用，经物料平衡计算得到缺氧区的吸磷量为 9~11 mg · L⁻¹，占总吸磷量的 36% 左右。同样可知约 38% 的 PHA 在缺氧段被用来吸磷，证明系统中存在反硝化除磷现象。另

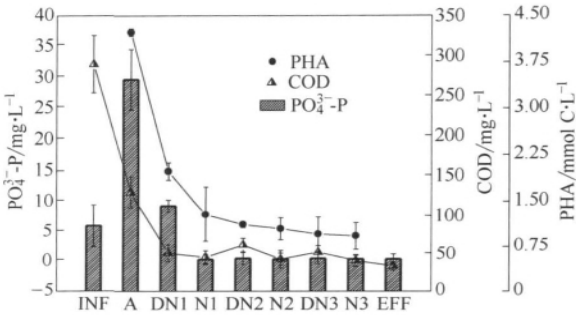


图 2 改良 UCT 分段进水工艺磷浓度、内碳源 PHA (PHB 和 PHV 之和) 和 COD 沿程变化

Fig. 2 Phosphorus, PHA and COD variations along modified UCT step feed process

外，在试验不同阶段进行缺氧吸磷批式试验，根据 Wachtmeister 等^[11] 方法计算 DPAOs 占 PAOs 的比例。结果表明，系统初期污泥中存在 9.8%~11.2% 的 DPAOs，缺氧吸磷速率仅为 0.22 mg P·(g VSS)⁻¹·h⁻¹。调整工艺运行参数后，缺氧吸磷速率提高至 3.19~4.48 mg P·(g VSS)⁻¹·h⁻¹，DPAOs 比例增加为 39.2% 左右。

2.3 改良 UCT 分段进水工艺反硝化除磷影响因素分析

2.3.1 体积分配对改良 UCT 分段进水工艺反硝化除磷的影响 活性污泥系统厌氧释磷情况将直接影响后续吸磷效果，利用静态批式试验研究二者的关系，结果表明相同试验条件下反硝化吸磷量和反硝化效果均与厌氧释磷量呈正比例关系，这与史静等^[12] 的结论一致。因此，欲提高改良 UCT 分段进水工艺反硝化吸磷性能，需寻找工艺最大厌氧释磷量，即最佳的厌氧池 HRT 和体积。

图 3 考察了 A-1(17/119/204 L)，A-2(25.5/110.5/204 L)，A-3(34/102/204 L) 和 A-4(42.5/93.5/204 L) 四种体积分配条件下厌氧区释磷量和系统出水磷浓度及磷去除率的关系（污泥回流 100%，内循环为 75%）。工况 A-1 到 A-4 随厌氧池体积增加，释磷量也逐渐增加；进水磷浓度基本相同（3.05~9.29 mg·L⁻¹），而出水浓度却随释磷量增加逐渐减小，磷去除率与释磷量表现出一致性。分析认为，厌氧体积过小导致厌氧 HRT 过短，那么（1）PAOs 缺少足够代谢时间吸收有机物维持其自身生长，系统中 PAOs 菌群绝对数量

低；（2）导致原水中可利用的溶解性有机物过多地进入缺氧区，普通异养反硝化菌优先以剩余有机物为电子供体进行反硝化反应，抑制 DPAOs 活性；（3）厌氧 HRT 过短，PAOs 等存储的内碳源 PHA 低，后续好氧吸磷动力不足。工况 A-3 厌氧/缺氧/好氧体积比为 1/3/6 的条件下获得满意的磷去除效果。

图 4 总结了四种体积条件下各污染物的去除率，反硝化速率和 DPAOs 反硝化吸磷特性。在保证系统硝化性能的条件下适当地调整厌氧和缺氧体积，对有机物和 TN 去除影响不大，四种工况条件下 COD 和 TN 去除率都保持在较高的水平，这正是与传统 A²/O、UCT 等相比分段进水工艺性能稳定可靠的优势所在^[13]。而磷去除与缺氧/好氧吸磷速率比有关，即 DPAOs 占 PAOs 的相对比例。随着厌氧体积的增加，原水有机物合成 PHA 量随之增加，则缺氧池反硝化作用因缺少足够有机物电子供体而减弱，剩余的硝酸盐和 PHA 为 DPAOs 创造了有利的生长环境，DPAOs 从 A-1 时 19.4% 增加至 A-3 时的 39.9%，强化了系统缺氧吸磷。当厌氧体积增加为 42.5 L（A-4）时，磷去除率增加趋于平缓，但是该阶段缺氧吸磷量因 HRT 过短而降低，好氧吸磷量增加，综合考虑曝气能耗等，工况 A-3 为最佳的体积分配。另外，由图 4 可见四个工况的反硝化速率基本相同（反硝化速率指单位时间单位污泥的异养反硝化菌和 DPAOs 去除的硝酸盐量），与反硝化吸磷量无明显关系，这与 A²/O 工艺结论不同^[14]，可能是由于计算方法的差异，

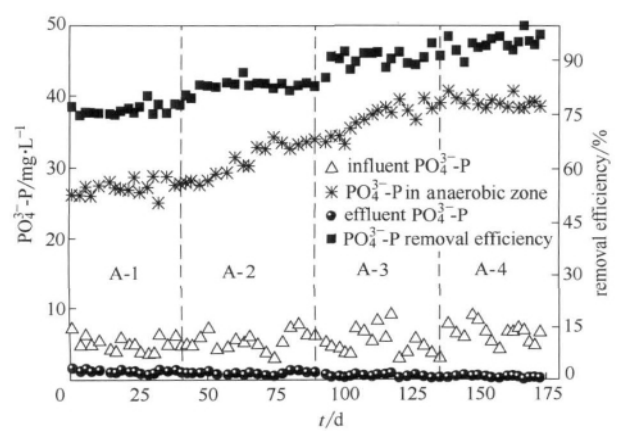


图 3 四种厌氧/缺氧/好氧体积分配条件下系统磷的去除特性

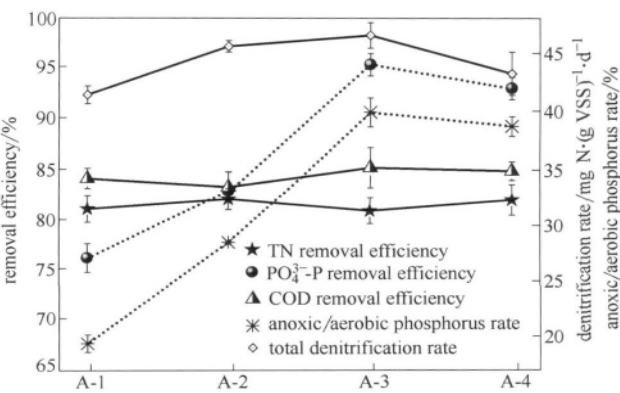


图 4 体积分配对污染物去除、反硝化速率和缺氧/好氧吸磷速率的影响

或者是因为分段进水工艺各段缺氧可以充分保证系统反硝化性能。

2.3.2 污泥回流 (R) 对改良 UCT 分段进水工艺反硝化除磷的影响 缺氧区反硝化除磷是 DPAOs 以硝酸盐为电子受体, 以厌氧池存储的 PHA 为能源, 过量摄取混合液中的磷并同步实现氮去除的过程。2.3.1 节讨论的体积分配影响释磷量和 PHA 量, 而充足的硝酸盐量电子供体是保证缺氧反硝化吸磷的必要条件。本工艺无硝化液内回流设施, 缺氧区硝酸盐主要来源于污泥回流, 因此, 合理控制污泥回流 R 对于系统反硝化除磷性能具有重要意义。维持相同的体积分配比, 开展了 B-1 (25%)、B-2 (50%)、B-3 (75%)、B-4 (100%) 和 B-5 (125%) 五种 R 条件下污染物去除和反硝化吸磷性能的试验。

控制污泥回流 R 可以有效调整系统 MLSS, 缺氧区硝酸盐浓度和 HRT (现 $R=25\%\sim 125\%$ 试验条件下该因素忽略不计)。图 5 为五种 R 条件对污染物去除和缺氧吸磷的影响。工况 B-1 R 为 25%, 平均 MLVSS 仅为 $2000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 远低于分段进水工艺通常条件下 MLVSS ($4000\sim 5000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 系统聚磷菌等微生物数量少, 且二沉池积聚大量活性污泥导致二次释磷和污泥上浮, 影响出水水质, 氮磷去除率低。工况 B-2 R 增加为 50%, MLVSS 趋于合理浓度, 氮磷去除率升高, 厌氧条件下存储的 PHA 内碳源和释磷为缺氧吸磷提供充分条件, 缺氧吸磷量增加到 32.5%。工况 B-1 和 B-2 氮磷去除差异主要是由 MLVSS 浓度过低所致。

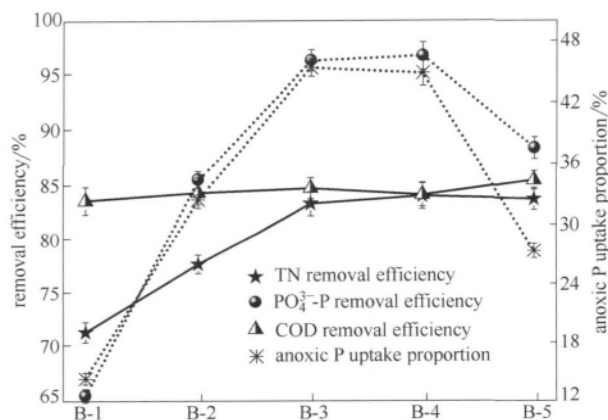


图 5 污泥回流对污染物去除和缺氧吸磷比例的影响

同等条件下反硝化菌的反硝化速率明显高于 DPAOs, 且反硝化过程结束后反硝化吸磷才进行。因此, 缺氧区硝酸盐浓度必须超过异养反硝化菌还原过程所需的最大值, DPAOs 才能利用剩余硝酸盐缺氧吸磷。B-3 和 B-4 的污泥回流条件均能为缺氧池提供足量的硝酸盐, 缺氧吸磷量所占比例为 44% 左右, 说明 DPAOs 在系统微生物种群中的比例增加, 反硝化除磷性能得到增强, 而氮磷去除率也分别增加到 96.4% 和 96.8%。继续提高 $R=125\%$ (B-5), TN 去除率不变, 磷和缺氧吸磷量比例均显著下降。以上试验现象分析原因如下: (1) 与 B-1 和 B-2 不同, B-3 和 B-4 两种条件下的缺氧池出水有 $1.0\sim 3.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 剩余硝酸盐, 此时反硝化吸磷性能最佳, 与 Yuan 等^[15] 研究结论一致; (2) 工况 B-5 中 R 值过大导致缺氧池硝酸盐浓度急剧上升, 同等内循环条件下携带的硝酸盐破坏厌氧池的厌氧环境。因此, 控制缺氧出水硝酸盐浓度可保证缺氧反硝化所需的电子受体, 有利于 DPAOs 的繁殖富集, 而且节能降耗。

2.3.3 内循环 (r) 对改良 UCT 分段进水工艺反硝化除磷的影响 内循环的大小影响厌氧池的 MLSS 浓度和硝酸盐浓度。图 6 给出了三种内循环 (C-1, $r=50\%$; C-2, $r=75\%$; C-3, $r=100\%$) 对系统磷去除性能和去除途径的影响。 $r=50\%$ 条件下, 厌氧池污泥浓度大约为 $3500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均厌氧释磷量、缺氧区和系统出水磷浓度分别为 37.8 、 15.7 和 $0.52\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率为 91.2%。 $r=75\%$ 时, 厌氧 MLSS 增加至 $4200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均释磷量和缺氧出水磷为 39.4 和 $13.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,

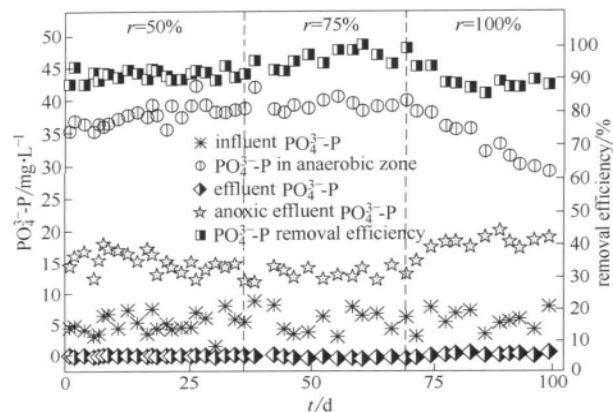


图 6 内循环对磷去除途径和去除效果的影响

经物料平衡计算缺氧区吸磷量较 $r=50\%$ 时略有提高。然而 $r=100\%$ 时 MLSS 虽升高但释磷量却急剧下降, 缺氧吸磷性能也相应减弱。分析发现, 该条件下厌氧区硝酸盐浓度较前两个阶段略微偏高, ORP 增加较明显, 从 $-400 \sim -150$ mV 增加为 $-120 \sim -50$ mV, 而且厌氧 HRT 缩短, 取该条件下的厌氧污泥研究硝酸盐浓度对释磷过程的影响, 结果发现当初始硝酸盐浓度为 $7 \sim 10$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时释磷速率才有明显的抑制, 而工况 C-1 厌氧硝酸盐浓度为 $0 \sim 0.3$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 不足以影响聚磷菌释磷, 因而过高的内循环携带的硝酸盐浓度引起 ORP 升高, 破坏了“严格意义上的”厌氧环境, 释磷和缺氧吸磷性能均下降。因此, 该试验研究条件下, 除磷性能对内循环的最大承受能力为 r 不能大于 100% , 但有机物和氮去除率较高。

2.4 强化改良 UCT 分段进水工艺反硝化除磷性能的运行策略

与传统 A^2/O 和 UCT 等相比, 改良 UCT 分段进水工艺具有合理利用原水碳源的特点, 在处理低 C/N 城市污水时具有明显的竞争优势。强化该工艺的反硝化除磷性能, 可进一步减少脱氮除磷过程对碳源的需求量。综合 2.3 节的讨论可采取以下运行控制策略: 首先, 必须保证厌氧池体积, 厌氧合成 PHA 量和释磷量是后续反硝化吸磷的必要条件, 各段最佳体积比为 $1/1/2$, 系统总体积比为 $1/3/6$ 。其次, 聚磷菌吸磷量与自身数量呈正比, 缺氧池需提供合适的硝酸盐电子受体和污泥浓度, 维持缺氧池出水有 3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硝酸盐剩余, 可控制污泥回流在 100% 左右。第三, 可考虑将厌氧池 ORP ($-400 \sim -150$ mV) 作为调节内循环的控制参数。另外, 原水碳氮比过高不利于 DPAOs 的富集生长, 对于这种污水水质可通过提高厌氧池体积和调整各段进水流量分配比例, 使得更多的有机物在厌氧池转化为内碳源 PHA, 削弱缺氧池异养反硝化菌的竞争力。

3 结 论

(1) 在进水流量分配比为 $40\% : 30\% : 30\%$, HRT 为 8 h, SRT 为 8 d, 改变其他运行参数的情况下, 系统硝化性能显著, 出水 TN 为 $8.01 \sim 11.2$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 为 $36.1 \sim 43.6$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 为 $0.27 \sim 1.29$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(2) 系统成功富集 DPAOs, 存在反硝化除磷现

象。污泥特性试验表明, 最佳运行工况条件下污泥缺氧吸磷速率为 $3.19 \sim 4.48$ $\text{mg} \cdot \text{P} \cdot (\text{g VSS})^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, DPAOs 比例最高为 39.2% 。

(3) 合理的控制策略是维持工艺反硝化除磷性能的重要措施。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。当厌氧/缺氧/好氧体积为 $34/102/204$ L ($1/3/6$) 时, 缺氧/好氧吸磷速率和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 去除率同时达到最大值 39.9% 和 95.5% 。提高污泥回流至 100% 能够强化反硝化除磷, 该条件下缺氧池污泥浓度和硝酸盐浓度均维持在合理的范围内。调整内循环 (75%), 使得厌氧池 ORP 维持在 $-400 \sim -150$ mV, 为聚磷菌释磷过程提供充分的厌氧环境, 保证后续缺氧反硝化吸磷的进行。

References

- [1] Ge Shijian (葛士建), Peng Yongzhen (彭永臻). Analysis and optimization control of the continuous step feed biological nitrogen and phosphate removal process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2009, 29 (12): 2465-2470
- [2] Kernn Jespersen J P, Henze M. Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic conditions [J]. *Water Research*, 1993, 27 (4): 617-624
- [3] Kuba T, Smolders G, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Biological phosphorus removal from waste-water by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor [J]. *Water Science and Technology*, 1993, 27 (5/6): 241-252
- [4] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Brandse F A, Heijnen J J. Occurrence of denitrifying phosphorus removing bacteria in modified UCT - type wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 1997, 31 (4): 777-786
- [5] López-Vázquez C M, Hooijmans C M, Brdjanovic D, Gijzen H J, van Loosdrecht M C M. Factors affecting the microbial populations at full-scale enhanced biological phosphorus removal (EBPR) wastewater treatment plants in The Netherlands [J]. *Water Research*, 2008, 42 (10/11): 2349-2360
- [6] García-Usach F, Ribes J, Ferrer J, Seco A. Calibration of denitrifying activity of polyphosphate accumulating organisms in an extended ASM2d model [J]. *Water Research*, 2010, 44 (18): 5284-5297
- [7] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [M]. 20th ed. Washington DC, USA, 1998
- [8] Oehmen A, Keller-Lehmann B, Zeng R J, Yuan Z G, Keller E. Optimisation of poly-beta-hydroxyalkanoate analysis using gas chromatography for enhanced biological phosphorus removal systems [J]. *Journal of Chromatography A*, 2005, 1070 (1/2): 131-136
- [9] Ge S J, Peng Y Z, Wang S Y, Guo J H, Ma B, Zhang L, Cao X. 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** (23): 9012-9019
- [10] Lee D S, Jeon C O, Park J M. Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system [J]. *Water Research*, 2002, **35** (16): 3968-3976
- [11] Wachtmeister A, Kuba T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. *Water Research*, 1997, **31** (3): 471-478
- [12] Shi Jing (史 静), Lü Xiwu (吕 锡 武). Effects of phosphorus release amount and temperature on denitrifying phosphorus removal in a two-sludge system [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2010, **61** (1): 166-171
- [13] Ge Shijian (葛 士 建), Peng Yongzhen (彭永臻), Zhang Liang (张 亮), Wang Ximing (王 希 明), Wang Shuying (王淑莹). Performance and material balance of modified UCT step feed enhanced biological nitrogen and phosphate removal process [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2010, **61** (4): 1009-1017
- [14] Wang Xiaolian (王晓莲), Wang Shuying (王淑莹), Wang Yayi (王 亚 宜), Peng Yongzhen (彭永臻). Control strategies of enhancing denitrifying phosphorus removal performance of the conventional Anaerobic-Anoxic-Oxic process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2006, **26** (5): 722-727
- [15] Yuan Zhiguo, Oehmen Adrian, Ingildsen Pernille. Control of nitrate recirculation flow in predenitrification systems [J]. *Water Science and Technology*, 2002, **45** (4/5): 29-36