

低 C/N 条件下 MUCT 工艺的反硝化除磷特性

尹军^{1,2}, 王晓玲^{1,2}, 吴相会², 吴磊²

(1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 吉林建筑工程学院市政与环境工程学院, 长春 130021)

摘要:以 C/N 较低的污水为处理对象, 重点研究和分析了 MUCT 工艺缺氧区的反硝化除磷特性. 结果表明, ①缺氧区 1 因为 COD 浓度相对较高, 回流污泥中的硝酸盐氮优先被传统反硝化菌利用, 不能作为 DPB 的电子受体, 所以主要发生释磷反应; ②缺氧区 2 内 DPB 利用厌氧段贮存大量 PHB 为碳源, 以硝酸盐氮为电子受体进行吸磷, 且吸磷量逐日提高, 从最初的 0.93 mg/L 增加至 18 mg/L, 缺氧吸磷率最终稳定在 40% 左右; ③缺氧区 3 内, 由于硝酸盐氮和 COD 浓度过低, 进行无效释磷反应过程, 释磷量在 0.27 ~ 3 mg/L 之间; ④系统对 COD、TN、TP 的去除率较高, 出水 TN 和 TP 浓度分别在 10 mg/L 和 0.9 mg/L 以下.

关键词:MUCT 工艺; 反硝化除磷; DPB; 缺氧吸磷量; 好氧吸磷量

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)11-2478-06

Character of Denitrifying Phosphorus Removal Using MUCT Process: Operation at Low C/N Rate

YIN Jun^{1,2}, WANG Xiao-ling^{1,2}, WU Xiang-hui², WU Lei²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Department of Environmental Engineering, Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun 130021, China)

Abstract: The effect of phosphorus uptake in the anaerobic zone of MUCT process fed with low C/N rate wastewater was studied. The experimental results shows that: ① Because of the concentration of the COD is relative higher, nitrate is firstly used by the traditional denitrifying bacteria in the cycle sludge, and can not act as the electron acceptor for DPB. So the main action in the first anaerobic zone is phosphate release; ② The DPB utilizes the PHB as the carbon stored in the anaerobic zone, and nitrate as electron acceptor to uptake phosphorus and the amount increases daily from 0.93 mg/L to 18 mg/L, and the anaerobic phosphorus rate stabilizes to 40 percent finally in the second anaerobic zone; ③ The ineffective phosphorus release process occurs in the third anaerobic zone because the lower nitrate and COD concentration, and phosphate release amount is from 0.27 to 3 mg/L; ④ The COD、TN、TP removal rates are higher and the TP and TN concentration in effluent is below 10 mg/L and 0.9 mg/L respectively.

Key words: MUCT process; denitrifying phosphorus removal; DPB; anaerobic phosphorus uptake amount; aerobic phosphorus accumulation amount

在生物除磷过程中, 聚磷菌起着关键的作用. 这类微生物能够以氧作为电子受体, 过量吸收废水中的磷, 并将其以聚磷的形式储存在体内^[1]. 最近的研究和实际运行结果表明, 至少存在一部分聚磷菌可在缺氧条件下进行吸磷, 这一类微生物被称为反硝化聚磷菌 (denitrifying phosphorus removing bacteria, DPB). DPB 具有与好氧聚磷菌极为相似的代谢特征^[2~4], 它们以 NO_3^- 作为电子受体, 利用内碳源聚 β 羟基丁酸酯 (PHB), 通过“一碳两用”的方式同时实现反硝化脱氮和吸磷过程, 因此, NO_3^- 不再被视为除磷工艺的抑制性因素. 以 NO_3^- 作为最终电子受体进行反硝化吸磷反应, 不仅 COD 耗量可节省 30%, 氧气耗量降低 20%, 污泥产量也可减少 30%^[5~9].

在各种生物法去除营养物质工艺 (biological nutrient removal, BNR) 中, UCT (University of Cape Town) 工艺由于消除了硝酸盐氮对厌氧释磷过程的影响, 强化了 BNR 工艺脱氮除磷的功能, 从而得到

较为广泛的应用^[10]. 荷兰 Genemuiden 污水厂、Holten 污水厂、Hardenberg 污水厂、Oresudsverket 污水厂等均采用该工艺净化污水. 大量的运行结果表明, 当 C/N 为 6 ~ 9 时, 在该工艺的缺氧区发生缺氧吸磷作用, 即在缺氧区进行反硝化作用的同时, 系统中的磷也同时被 DPB 吸收并以聚磷的形式贮存在其体内, 系统具有反硝化除磷特性, 批量试验的结果也证明在聚磷污泥中存在着 DPB^[11~13]. 但是上述研究结果都是基于 UCT 工艺在较高的 C/N 条件下运行而得到的, 而对于 MUCT 工艺在低 C/N 条件下的反硝化除磷特性至今鲜见报道, 为此本研究对其进行了重点分析和考察, 以期指导系统的优化运行, 提高系统的脱氮除磷效果, 节约运行费用.

收稿日期: 2006-11-22; 修订日期: 2007-01-06

基金项目: 吉林省重大科技发展计划项目 (20040405-1)

作者简介: 尹军 (1954 ~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为污水处理与资源化技术, E-mail: smile_xl@tom.com

1 材料与方法

1.1 试验装置

MUCT 工艺的试验装置见图 1. 试验装置由有机玻璃制成, 为一体化设备, 共分为 3 个区, 分别是厌氧区、缺氧区、好氧区, 每一区又分若干小格室: 厌氧区 2 格, 缺氧区 3 格, 好氧区 5 格. 试验装置总容积

90 L, 其中厌氧区 18 L, 缺氧区 27 L, 好氧区 45 L. 厌氧区和缺氧区内设有搅拌机以保持泥水混合液的悬浮状态, 压缩空气通过曝气砂头通入好氧区. 污水在生化反应池中整体上呈推流式向前流动, 而在小格室内由于曝气和搅拌的混合作用则处于完全混合状态. 整套系统通过重力流运转. 为便于取样, 各反应区侧壁上设多个取样口.

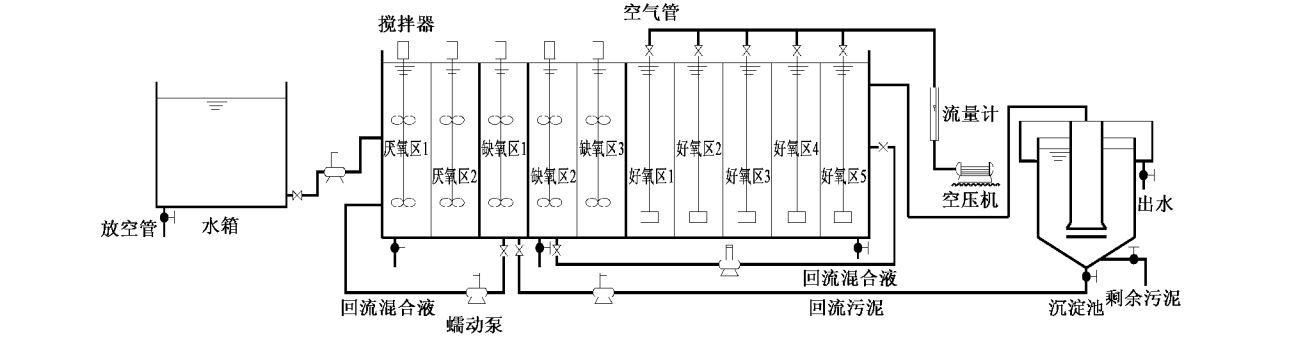


图 1 MUCT 工艺试验装置
Fig.1 Experimental set-up of MUCT process

试验的进水、混合液回流比 a (好氧区 5 回流至缺氧区 2)、混合液回流比 γ (缺氧区 1 回流至厌氧区 1) 以及污泥回流比 S 等均由蠕动泵控制. 温度由温控仪控制在 $20 \sim 22^{\circ}\text{C}$, pH 值维持在 7 左右, 好氧区 DO 保持在 $2 \sim 4 \text{ mg/L}$ [14].

1.2 检测项目和分析方法

试验测定 COD、TP、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、pH、水温、DO、ORP、MLSS 等指标, 均采用国家规定的标准方法. 水样经离心机离心后测定. DO、ORP、pH 测定采用 WTW-pH/OXi340 便携式在线测定仪.

1.3 试验接种污泥与试验污水

接种污泥为长春市西郊污水处理厂二沉池回流污泥. 其性状为: 污泥颜色为黄褐色, 沉降性能很好, SVI 为 80 左右. 接种污泥取回后, 向其中加入少许

营养物质(啤酒)闷曝 2 d, 充分恢复其活性后, 接种于 MUCT 工艺.

在系统启动运行初期, 为确定最佳运行条件进行了试验调试. 经过 25d 的调试过程, 确定试验污水配方为啤酒 2.76 mL/L 、氯化铵 0.12 g/L 、磷酸二氢钾 0.03 g/L 、硫酸镁 0.05 g/L 、无水氯化钙 0.01 g/L 、碳酸氢钠 0.25 g/L . 进水水质情况见表 1. 试验运行参数为进水量 10 L/h , 厌氧区、缺氧区、好氧区的 HRT 分别为 1.8 h 、 2.7 h 、 4.5 h , 回流污泥比 S 为 1, 混合液回流比 a 为 2.5、混合液回流比 γ 为 1, 厌氧区、缺氧区 1、缺氧区 2、缺氧区 3 以及好氧区污泥质量分数分别为: 11% 、 11% 、 11% 、 11% 、 56% , 污泥龄控制在 15 d 左右, 剩余污泥量根据 Hao 等推荐的公式计算 [15].

表 1 进水水质特性/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
Table 1 Characteristics of influent wastewater/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD ₅	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	TP
最大值~最小值	359.7 ~ 198.66	215.4 ~ 110.93	49.18 ~ 20	51.28 ~ 22.25	12.1 ~ 4.91
平均值	269.31	161.48	39.3	41.40	7.16

系统运行调试 25 d 后, 镜检活性污泥生物相, 发现菌胶团性状较好, 并观测到具有指示性作用的原生动物累枝虫, 见图 2 和图 3. 系统具有了一定的降解 COD、硝化以及除磷功能, 已启动成功, 可以进行跟踪测定. 试验方案见表 2.

表 2 MUCT 工艺运行试验方案
Table 2 Run cycles of experiments of MUCT process

运行周期	内容
第 I 阶段(0 ~ 25 d)	确定最佳运行参数
第 II 阶段(26 ~ 35 d)	驯化培养 PAOs
第 III 阶段(36 ~ 68 d)	积累富集 DPB

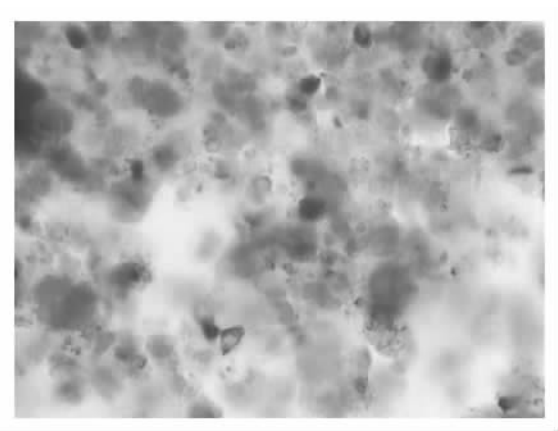


图 2 光学显微镜下的菌胶团
Fig.2 Microscopic images of zoogloea



图 3 光学显微镜下的累枝虫
Fig.2 Microscopic images of epistylis

2 结果与讨论

2.1 对 TP 的去除效果

图 4 给出了 MUCT 工艺后 2 个阶段各反应区及进出水 TP 浓度的变化规律。从图 4 可以看出,由于系统在取样测定之前已进行了 25 d 的试运行,所以在第 II 阶段初期,磷在厌氧区就有一定数量的释放,使系统表现出一定的除磷效果,但去除率较低。第 II 阶段系统的除磷率从 25.8% 上升至 77.9%,吸磷量/释磷量的比值从 1.07 上升至 1.18。进入第 III 阶段后,系统的除磷效果变好,除磷率稳定在 85.4% ~ 99.8% 之间(除第 40 d 以外),出水磷浓度均在 0.9 mg/L 以下。吸磷量/释磷量的比值稳定在 1.15 ~ 1.34 之间,该结果与王晓莲等^[16,17]报道的结果基本一致。在系统运行的第 40 d 总磷的去除效果很差,仅有 3.7%,其原因是当日由缺氧区 1 回流至厌氧区 1 的混合液回流蠕动泵发生了堵塞,厌氧区内污泥浓度

仅为 1 025 mg/L。较低的生物量使系统的释磷效果受到很大影响,释磷量为 20.6 mg/L,仅是平均释磷量的一半,由此导致吸磷反应不充分,故影响了出水水质^[18]。经及时调整,消除了这一故障后,系统很快恢复到原有的良好除磷状态,说明该系统具有较强的耐冲击负荷能力。

从图 4 还可以看出,在运行的第 II 阶段和第 III 阶段,缺氧区 1 和缺氧区 2 中总磷浓度均有所下降。经分析,原因主要有 3 个:一是回流污泥、混合液的稀释作用;二是微生物的同化作用;三是反硝化吸磷作用。根据缺氧区总磷的物料平衡分析结果可知,在缺氧区 1 内主要发生释磷反应,而总磷浓度的下降主要是由回流污泥的稀释作用和微生物的同化作用引起的。结合图 7 可见,由于进入缺氧区 1 的混合液中 COD 浓度相对较高,使有机碳源和硝酸盐氮共存,导致回流污泥中的硝酸盐氮优先被传统反硝化菌利用,不能作为 DPB 的电子受体^[19],所以缺氧区 1 内不吸磷,反而释磷。

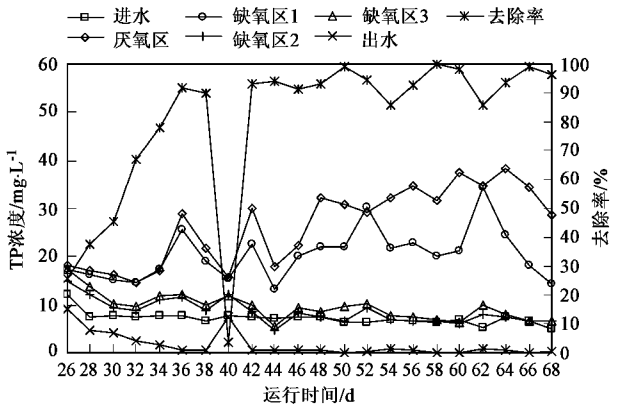


图 4 各反应区 TP 的变化规律
Fig.4 Variation of TP concentration of each reaction zone

缺氧区 2 的吸磷量变化规律见图 5,其中负值表示释磷量,正值表示吸磷量。系统好氧吸磷率、缺氧吸磷率的变化规律见图 6,其中好氧吸磷率表示

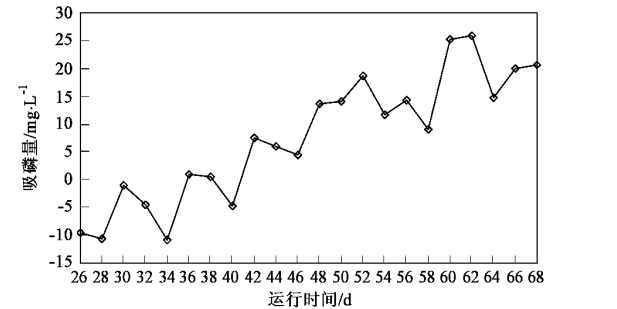


图 5 缺氧区 2 吸磷量的变化规律
Fig.5 Variation of phosphorus uptake concentration of anoxic zone 2

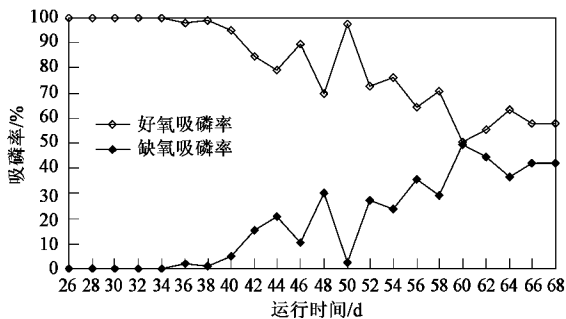


图6 系统缺氧吸磷率和好氧吸磷率的变化规律

Fig.6 Variation of anoxic and aerobic phosphorus uptake rate

好氧吸磷量占总吸磷量的质量分数,缺氧吸磷率表示缺氧吸磷量占总吸磷量的质量分数.从图 5 可以看出,在系统运行的第Ⅱ阶段,缺氧区 2 首先发生释磷反应,这主要是因为在该缺氧区内,DPB 尚未得到充分的富集,而且结合图 7 分析可知,进入缺氧区 2 的混合液中 COD 浓度较低,外碳源不足,所以第Ⅱ阶段硝酸盐氮的去除主要是传统反硝化菌利用内源呼吸过程释放的能量来实现的,而总磷浓度的下降是由混合液的稀释作用和微生物的同化作用引起的,聚磷污泥不具备吸磷功能.从图 6 给出的图形也可以看出,这一阶段好氧吸磷率为 100%,说明聚磷污泥中好氧聚磷菌占有绝对优势,厌氧区释放的磷全部被好氧聚磷菌吸收.

MUCT 工艺中厌氧/缺氧交替环境的存在有利于 DPB 的积累与富集^[20,21],所以经过一段时间的培养与驯化后,当系统运行到第Ⅲ阶段时,缺氧区 2 开始出现吸磷现象,最初吸磷量为 0.93 mg/L,缺氧吸磷率为 1.75%.此时缺氧区 2 总磷浓度的下降是混合液稀释、微生物的同化以及缺氧吸磷共同作用的结果.其后随着运行时间的延长,厌氧/缺氧交替的环境不断地得到强化,聚磷污泥中 DPB 的数量越来越多,缺氧吸磷量也逐日提高^[22],直到增加至第 49d 的 16.07 mg/L,缺氧吸磷率达到 36.6%.自此之后缺氧吸磷量不再增加,基本保持稳定,缺氧吸磷率也稳定在 40%左右.DPB 的富集过程反应在图形上就是缺氧吸磷量逐日增多(图 5),缺氧吸磷率逐日提高(图 6).

对于缺氧区 3 而言,在第Ⅱ阶段和第Ⅲ阶段总磷浓度均升高,发生释磷反应.第Ⅱ阶段释磷量为 3.12 ~ 11.20 mg/L,第Ⅲ阶段为 0.27 ~ 3.11 mg/L.第Ⅱ阶段 DPB 培养驯化不成熟,系统不具备缺氧吸磷功能,所以缺氧区 3 发生释磷过程且释磷量较高.而第Ⅲ阶段发生释磷过程的原因是混合液回流比 a

较小,硝酸盐氮浓度较低,平均在 0.5 mg/L 左右,导致 DPB 没有足够的电子受体,反硝化吸磷作用受到抑制^[23].结合图 7 分析可知,第Ⅲ阶段大部分有机污染物质在厌氧区由聚磷菌吸收转化为 PHB 贮存在体内,又经历了缺氧区 1 和 2 的传统反硝化菌和 DPB 的反硝化作用,所以到达缺氧区 3 的有机污染物质浓度较低,且大部分为难降解物质,导致在缺氧区 3 内聚磷菌的释磷过程不贮存 PHB,属内源呼吸释磷,即无效释磷^[18],但释磷量较低,对系统的除磷效果影响较小.运行过程中,为避免缺氧区 3 内的无效释磷反应过程,优化系统的运行,可适当提高混合液回流比 a .

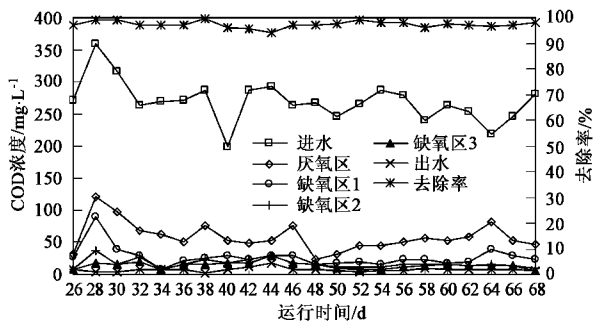


图7 各反应区 COD 的变化规律

Fig.7 Variation of COD concentration of each reaction zone

2.2 对 COD 的去除效果

图 7 为后 2 个阶段系统进出水及各反应区 COD 的浓度变化规律.观察曲线发现,经过近 25 d 的试验调试过程,污泥已经过驯化,而且啤酒又属易降解有机物质^[24],所以即使进水 COD 浓度波动较大,系统对 COD 的去除率也保持稳定.在运行期间,系统进水 COD 浓度为 198.66 ~ 359.7 mg/L 时,出水 COD 浓度为 3.01 ~ 17.29 mg/L, COD 去除率为 94.1% ~ 99.0%,平均为 97.3%.另外,从图 7 还可以看出,大部分的 COD 在厌氧区即被去除,厌氧区出水 COD 浓度为 24.08 ~ 120.40 mg/L,去除率为 70.5% ~ 85.6%,平均为 81.2%.厌氧区对有机物的高去除率使进入后续缺氧区、好氧区的 COD 浓度大幅度降低,这有利于硝化菌、DPB 的积累富集^[25].

2.3 对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN 的去除效果

观察图 8 氨氮浓度变化曲线,可以看出经过近 25 d 的试验调试,污泥中含有了一定数量的硝化菌,第Ⅱ阶段好氧区具有较高的硝化性能.这里需要指出的是,虽然氨氮浓度在厌氧区和缺氧区也有所降低,且幅度比较大,但这种降低是由回流混合液的稀释作用而非硝化作用引起的.该系统进水氨氮为 20

~49.18 mg/L, 出水为 0 ~ 4.12 mg/L, 平均为 1.5 mg/L 左右, 氨氮去除率为 89.9% ~ 100%, 平均为 96.7%. 系统较好的硝化效果, 可促进生物聚磷污泥中 DPB 的生长与繁殖^[25].

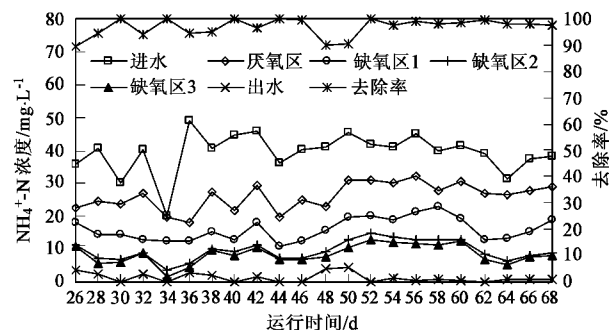


图 8 各反应区 NH_4^+-N 的变化规律

Fig. 8 Variation of NH_4^+-N concentration of each reaction zone

图 9 给出了后 2 个阶段系统进出水及各反应区 TN 浓度的变化规律. 从图 9 可以看出, 进水 TN 为 22.25 ~ 51.28 mg/L 时, 出水为 3.89 ~ 9.78 mg/L, 平均去除率为 78.9%. 由于 C/N 较低, 所以系统对 TN 去除率不是很高, 且有少量的硝酸盐随混合液回流入厌氧区, 但试验研究证明, 混入的硝酸盐氮量较少, 对释磷过程的影响不大, 所以系统一直维持较高的除磷效果.

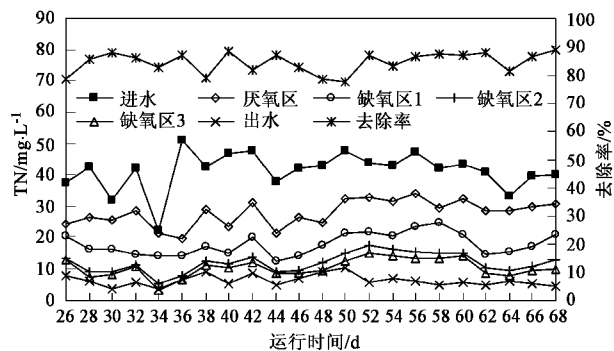


图 9 各反应区 TN 的变化规律

Fig. 9 Variation of TN concentration of each reaction zone

3 结论

(1) 低 C/N 条件下运行的 MUCT 工艺对 COD 的去除效果受进水浓度的影响较小, 一直维持在较高的水平, 出水 COD 浓度为 3.01 ~ 17.29 mg/L, 平均去除率为 97.3%, 其中厌氧区平均去除率为 81.2%. 厌氧区对有机物的高去除率有利于硝化菌、DPB 的积累富集.

(2) 低 C/N 条件下运行的 MUCT 工艺硝化效果

非常好, NH_4^+-N 平均转化率为 96.7%. 较好的硝化效果可促进生物聚磷污泥中 DPB 的生长与繁殖. 系统 TN 出水 3.89 ~ 9.78 mg/L, 平均去除率为 78.9%. 由于污水 C/N 较低, 所以偶尔有少量的硝酸盐随混合液回流入厌氧区 1, 但对释磷过程的影响不大, 系统的除磷效果维持在较高的水平.

(3) 系统的除磷效果呈逐渐增强的趋势, 在系统运行的第 III 阶段, 除磷率稳定在 85% ~ 99% 之间, 出水磷浓度均在 0.9 mg/L 以下. 物料衡算结果表明, 系统缺氧区 1 内发生释磷反应. 缺氧区 2 在运行初期发生释磷反应, 但随着运行时间的延长, 厌氧/缺氧环境不断得到强化, 系统中 DPB 不断积累富集, 所以在缺氧区 2 内发生了吸磷反应, 吸磷量从最初的 0.93 mg/L, 增加至 18 mg/L, 缺氧吸磷率从 1.75% 增加至 36.6%, 并稳定在 40% 左右. 在系统运行期间, 缺氧区 3 发生释磷反应过程, 第 II 阶段发生释磷反应且释磷量较高的原因是 DPB 培养驯化不成熟, 而第 III 阶段发生释磷过程的原因是混合液回流比 a 较小.

参考文献:

- [1] Chuang S H, Ouyang C F. The biomass fraction of heterotrophs and phosphate accumulating organisms in a nitrogen and phosphorus removal system[J]. Wat Res, 2000, 34(8): 2238 ~ 2290.
- [2] Bortone G, Marsili L S, Tilche A, et al. Anoxic phosphate uptake in the DEPHANOX process[J]. Wat Sci Tech, 1999, 40(4 ~ 5): 177 ~ 185.
- [3] Wachtmeister A, Kuba T, van Loosdrecht M C M, et al. A sludge characterization for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge[J]. Wat Res, 1997, 31(3): 471 ~ 478.
- [4] Mino T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process[J]. Wat Res, 1998, 32(11): 3193 ~ 3207.
- [5] Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor[J]. Wat Sci Tech, 1993, 27(5 ~ 6): 241 ~ 252.
- [6] 王亚宜, 彭永臻, 王淑莹, 等. 反硝化除磷理论、工艺及影响因素[J]. 中国给水排水, 2003, 19(1): 33 ~ 36.
- [7] Keren Jespersen J P, Henze M. Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic conditions[J]. Wat Res, 1994, 5(28): 1253 ~ 1255.
- [8] Chuang S H, Ouyang C F, Wang Y B. Kinetic competition between phosphorus release and denitrification on sludge under anoxic condition[J]. Wat Res, 1996, 30(12): 3961 ~ 3968.
- [9] Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus and nitrogen removal at with minimal COD requirement by integration of nitrification in a two-sludge system[J]. Wat Res, 1996, 42(1 ~ 2): 1702 ~ 1710.
- [10] 史忠义, 史京华, 刘希曾, 等. 废水工程处理及回用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 585 ~ 588.

[11] Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Brandse F A, *et al*. Occurrence of denitrifying phosphorus removing bacteria in modified UCT-type wastewater treatment plants[J]. *Wat Res*, 1997, **31**(41): 777 ~ 786.

[12] 祝贵兵, 彭永臻. 生物除磷设计与运行手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. 105 ~ 109.

[13] Østgaard K, Christensson M, Lie E, *et al*. Anoxic Biological phosphorus removal in a full-scale UCT process[J]. *Wat Res*, 1997, **31**(11): 2719 ~ 2726.

[14] Mulkerrinsa D, Dobson A D W, Collieran E. Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters [J]. *Environment International*, 2004, **30**: 249 ~ 259.

[15] Di H X, Van Loosdrecht M C M, Meijer S C F, *et al*. Model Based Evaluation of Two BNR Process UCT and A₂N[J]. *Wat Res*, 2000, **35**(12): 2851 ~ 2860.

[16] 王晓莲, 王淑莹, 马勇, 等. A²/O 工艺中反硝化除磷及过量曝气对生物除磷的影响[J]. *化工学报*, 2005, **56**(8): 1565 ~ 1570.

[17] Warangkana Punrattanasin. Investigation of the effects of COD/TP ratio on the performance of a biological nutrient removal system[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.

[18] 严熙世. 水与废水技术研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994. 486 ~ 521.

[19] 张锡辉, 刘勇弟. 废水生物处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 318 ~ 366.

[20] 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]. *Wat Res*, **35**(16): 3968 ~ 3976.

[21] 李勇智, 王淑莹, 吴凡松, 等. 强化生物除磷系统中反硝化聚磷菌的选择与富集[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(1): 45 ~ 49.

[22] Peng Y Z, Wang X L, Li B K. Anoxic biological phosphorus uptake and the effect of excessive aeration on biological phosphorus removal in the A²O process[J]. *Desalination*, 2006, **189**: 155 ~ 164.

[23] 王亚宜, 彭永臻, 李探微. A₂N 连续流双污泥系统反硝化除磷脱氮试验研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, **36**(8): 1046 ~ 1049.

[24] 谭学军. 污水生物处理系统电子传递体系活性检测与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005. 77 ~ 78.

[25] 王亚宜. 反硝化除磷脱氮机理及工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004. 45 ~ 58.