

城市污水三污泥系统自养脱氮与强化生物除磷

易鹏¹, 张树军^{2*}, 甘一萍², 常江², 彭永臻¹, 曹相生¹

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100022)

摘要:采用“A/O 除磷+半亚硝化-厌氧氨氧化自养脱氮”三污泥系统, 实现了城市污水营养物经济高效去除. 结果表明, 在水力停留时间(HRT)为 3.6 h 条件下, A/O 除磷系统出水总磷(TP) ≤ 0.5 mg/L; 在常温、DO < 0.2 mg/L 和 HRT = 4.6 h 条件下, 半亚硝化系统实现了亚硝氮累积率为 75% ~ 96% 的半亚硝化; 在温度为 27 ~ 30℃ 和 HRT = 1.4 h 条件下, 厌氧氨氧化(ANAMMOX)系统出水总氮(TN) ≤ 8 mg/L, 最低值为 1.6 mg/L, TN 去除负荷达到 0.57 kg/(m³·d). 三污泥系统中聚磷菌、氨氧化菌和 ANAMMOX 菌均在各自适宜的环境条件下生存, 优化了污泥种群, 提高了各工艺单元的处理效率. 城市污水自养脱氮系统理论上可以减少 62.5% 的供氧量, 节省 100% 反硝化碳源, 同时降低了污泥产量, 大大减少了 CO₂ 的排放. 与传统的生物脱氮除磷工艺相比, 三污泥系统具有节能降耗减排上的巨大优势和潜力, 也有利于实现水资源的循环利用和可持续发展.

关键词:城市污水; 三污泥系统; 强化生物除磷; 半亚硝化; 厌氧氨氧化

中图分类号:X703.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)10-2390-08

Autotrophic Nitrogen Removal and Enhanced Biological Phosphorus Removal from Municipal Wastewater in a Three-sludge System

YI Peng¹, ZHANG Shu-jun², GAN Yi-ping², CHANG Jiang¹, PENG Yong-zhen¹, CAO Xiang-sheng¹

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100022, China)

Abstract: Using a three-sludge system consisted of anaerobic/oxic (A/O) process, partial nitrification and anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) reactors, cost-effective removal of nitrogen and phosphate from municipal wastewater was achieved. The experimental results showed that effluent total phosphorus (TP) of the A/O system was less than 0.5 mg/L under hydraulic retention time (HRT) of 3.6 h. Partial nitrification with nitrite accumulation efficiency of 75%~96% was realized in the partial nitrification system under room temperature, DO < 0.2 mg/L and HRT of 4.6 h. Under temperature of 27~30℃ and HRT of 1.4 h, effluent total nitrogen (TN) and TN removal rate of ANAMMOX reactor were less than 8 mg/L with the minimum value of 1.6 mg/L and 0.57 kg/(m³·d), respectively. In the three-sludge system, phosphate accumulating organisms, ammonia-oxidizing bacteria and Anammox bacteria existed under suitably environmental condition to optimize the microbial community structure and improve treatment efficiency of various units. Autotrophic nitrogen removal can reduce 62.5% of the oxygen supply, save 100% of denitrification carbon sources theoretically, lower the sludge production, and greatly decrease carbon dioxide emission. As compared to traditional biological nutrient removal process, the three-sludge system has great advantages and potential in energy saving and carbon dioxide emission reduction to realize sustainable development of water resources.

Key words: municipal wastewater; three-sludge system; enhanced biological phosphorus removal; partial nitrification; ANAMMOX

我国多数城市污水的 C/N 低, 依靠传统脱氮除磷工艺, 存在供氧动力消耗大、反硝化碳源不足、产生大量剩余污泥、难以同时保证高效脱氮除磷等弊端, 无法满足污水处理厂出水水质标准日益提高的要求. 因此, 亟待探寻低碳源城市污水脱氮除磷新方法与新途径.

传统生物脱氮除磷工艺多采用单污泥系统, 即利用同一混合微生物种群完成有机物氧化、硝化、反硝化和除磷, 如 A²O、UCT、CASS、UNI-TANK 等, 但多种处理功能的高度关联性增大了运行控制的难

度, 也限制了其处理效能^[1, 2]. 因碳源缺乏及硝化菌和聚磷菌泥龄的差异, 导致传统城市污水处理工艺无法同时实现高效脱氮除磷. 针对传统生物脱氮除磷工艺存在的问题, 笔者开发出活性污泥法三污泥自养脱氮和强化生物除磷工艺, 它可以解决多种

收稿日期: 2009-11-26; 修订日期: 2010-02-02

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAC19B01); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07314-008); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-YW-G-054)

作者简介: 易鹏(1985~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水深度处理与回用, E-mail: yipeng_1985@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: lzsj@tom.com

微生物在同一反应器中混合培养所导致的脱氮与除磷的矛盾,各种微生物在适宜的条件下生长有利于充分发挥各自的作用,避免相互干扰,从而更好地同时实现脱氮除磷的目标.此外,采用半亚硝化-ANAMMOX 生物自养脱氮技术^[3-5]处理城市污水,可以减少污泥产量、无需外加碳源和降低供氧能耗.在与传统工艺相同 HRT 甚至低于该值条件下,都能够达到更好的处理效果,有效解决了系统中碳源不足的问题,同时减少了温室气体 CO₂ 的排放,有利于节能减排和实现水资源的健康可持续发展.

基于以上现状分析,本试验采用三污泥系统对

低 C/N 城市污水自养脱氮和强化生物除磷进行了有效的尝试和探索,考察了各污泥系统的运行情况和处理效能,取得了相应的成果,为现有污水处理厂工艺改造和新建污水处理厂工艺选择提供了一种新的思路和技术.

1 材料与方 法

1.1 试验装置

试验装置采用三污泥系统型式,由前除磷系统、中间半亚硝化系统和后 ANAMMOX 系统 3 部分组成,实物简化模型和反应流程如图 1 所示.

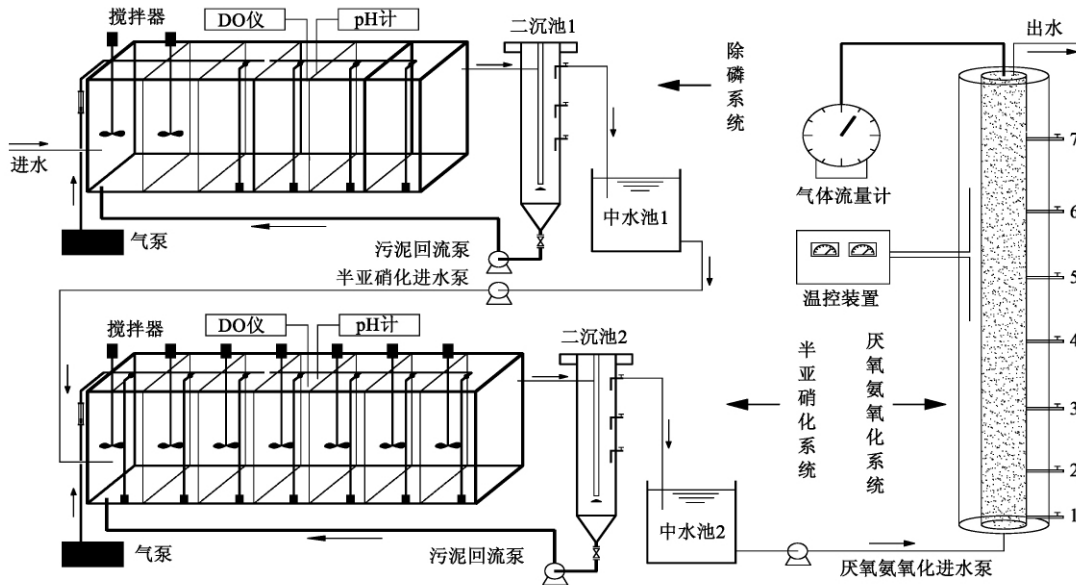


图 1 三污泥系统流程

Fig.1 Schematic diagram of three-sludge system

除磷系统由 A/O 反应器和二沉池 1 组成,反应装置为有机玻璃材质,平均分成 6 个格室,每格室有效容积 4 L,前 2 个格室为厌氧区,后 4 个格室为好氧区.二沉池 1 为竖流式,有效容积为 12 L.运行期间进水量约 156 L/d,污泥回流比为 75%,泥龄(SRT)为 3~5 d.曝气装置采用砂块曝气头,由转子流量计控制气量,好氧区 DO 浓度平均为 2.0 mg/L.

半亚硝化系统由推流式好氧反应器和二沉池 2 组成,反应装置为有机玻璃材质,平均分成 7 个格室,每格室有效容积 4 L.曝气装置采用砂块曝气头,由转子流量计控制气量.反应器每个格室内安装搅拌器(搅拌叶片面积 $A = 18 \text{ cm}^2$,转速 200 r/min),搅拌器叶片悬于格室底部,提供混合动

力,以加强传质和防止污泥沉降.二沉池 2 为竖流式,有效容积为 15 L.运行期间进水量约 144 L/d, SRT 约 200 d.

ANAMMOX 系统采用 UASB 型式,反应装置为有机玻璃材质,高 170 cm,内直径 8 cm,有效容积约 8.5 L.反应器外裹水浴套桶,亦为有机玻璃材质,直径为 40 cm,由温度控制系统控制水浴区温度在 27~30℃.最外层覆盖一层保温、避光的黑色材料,产气通过气压计来衡量,运行期间进水量约 142 L/d.三污泥系统各反应器进水和污泥回流均采用蠕动泵控制.

1.2 试验原水

试验原水为北京高碑店污水处理厂初沉池出水,具体水质指标如表 1 所示.

表 1 试验原水水质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
Table 1 Characteristics of raw wastewater/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	pH	COD	TN	NH_4^+-N	NO_2^--N	NO_3^--N	TP
范围	7.0~7.8	61.6~309.2	43.6~60.7	35.1~57.7	0~0.1	0.1~1.4	4.76~8.03
平均值	7.5	166.7	55.4	51.3	0.05	0.7	6.42

1.3 各反应器的启动

1.3.1 A/O 反应器的启动

A/O(厌氧/好氧)反应器为前处理部分,主要功能是除磷和降解 COD,接种种泥为某 A²/O 工艺中试回流污泥,接种量 5 L,污泥浓度 12 000 mg/L. 为实现高效除磷将 SRT(3~5 d)控制在适宜聚磷菌生长的范围内,经过 2~3 个 SRT 运行周期,硝化菌逐渐被淘洗出系统,使得该反应器基本失去硝化能力,污泥种群因此得到优化,有效解决了除磷菌与硝化菌因 SRT 不同而造成的脱氮与除磷不能兼顾的矛盾,使除磷和降解 COD 效率得到提高. 这也为后面的半亚硝化系统提供了良好的水质条件.

1.3.2 半亚硝化反应器的启动

试验采用接种混合污泥的方法启动反应器,混合污泥包括 2 种不同来源的污泥,分别为短程硝化污泥(用于高氨氮废水的短程硝化试验)和全程硝化污泥(高碑店污水处理厂二沉池回流污泥),接种短程硝化污泥 15 L,全程硝化污泥 5 L. 混合污泥 MLSS 为 12 000 mg/L. 采用 FISH (fluorescence in situ hybridization) 技术^[6,7]对混合污泥中氨氧化细菌(AOB)和亚硝酸氧化细菌(NO₂)作了检测. 经数学方法统计,AOB 和 NO₂ 占种群生物量的质量分数分别为 7.90% 和 3.18%. 接种后,反应器内 MLSS 约为 4 000 mg/L 左右,SV₃₀ 和 SVI 值分别为 35% 和 85 mL/g 左右,控制反应器各格室 DO < 0.2 mg/L,调整 HRT(4.6 h),使氨氮转化大约一半左右,初期亚硝氮累积率为 78.9%,随着反应器的运行,亚硝氮累积率稳步提高. 原水经 A/O 反应器处理后,COD 降解比较充分,有利于半亚硝化系统污泥种群的优化.

1.3.3 ANAMMOX 反应器的启动

本试验使用的 ANAMMOX 反应器,之前用于处理高氨氮废水的研究,具有较强 ANAMMOX 处理能力,所以本试验省去了该反应器的启动过程,直接以半亚硝化反应器出水作为进水,研究该反应器处理低氨氮城市污水的脱氮性能.

1.4 分析项目与方法

试验过程中的水质监测分析方法参见文献[8]. COD 采用重铬酸钾法;氨氮采用纳氏试剂分

光光度法;亚硝酸盐采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;硝酸盐采用麝香草酚分光光度法;TP 采用钼锑抗分光光度法;pH 采用 pH 测定仪(德国 WTW);DO 采用 DO 测定仪(德国 WTW);碱度采用酸碱指示剂滴定法(以 CaCO₃ 计);MLSS 采用重量法.

2 结果与讨论

2.1 A/O 反应器运行情况

2.1.1 进出水 TP 变化与 TP 去除率

城市污水中 C/P 约为(50~100):1,对于单纯除磷系统而言,满足微生物的营养配比,可以实现较好的除磷效果. A/O 反应器 HRT 为 3.6 h,MLSS 均值为 3 200 mg/L,进出水 TP 变化与 TP 去除率如图 2 所示,进水 TP 为 4.7~8.1 mg/L,均值为 5.8 mg/L,出水 TP 在启动初期波动较大,基本为 0.8~3.3 mg/L,经过 3~5 个 SRT 运行周期,出水 TP 稳定在 0.5 mg/L 以下. TP 去除率由反应初期的 80% 左右升高至 95% 以上,除磷效率高于传统生物脱氮除磷工艺,如 A²/O、UCT、MUCT、JHB 工艺等. A/O 反应器厌氧段由于没有回流硝氮和亚硝氮的影响,严格的厌氧区得以保证,同时避免了与聚磷菌争夺碳源的反硝化作用的发生. 所以,原水中丰富和充足的可生化降解有机物,可供聚磷菌较好地吸收基质,产生选择性增殖^[9],从而使生物除磷效能得到强化.

2.1.2 进出水 COD 变化与 COD 去除率

进出水 COD 变化与 COD 去除率如图 3 所示,进水 COD 为 61.6~309.2 mg/L,出水 COD 为 28.2~84.2 mg/L,均值为 46.0 mg/L,COD 去除率大部分在 70% 以上. 出水 COD 受进水 COD 波动的影响较小,这是由于进水中的有机物大部分在厌氧条件下被去除,另外好氧氧化分解剩余少量 COD,双重作用,使得在进水 COD 负荷波动较大的情况下,出水 COD 均能保持低值水平,且基本为难生化降解 COD.

2.1.3 稳态运行时的沿程参数变化

试验稳态运行至 51 d 时,进行沿程取样分析,TP 和 COD 变化情况如图 4 所示,进水 TP 为 5.9

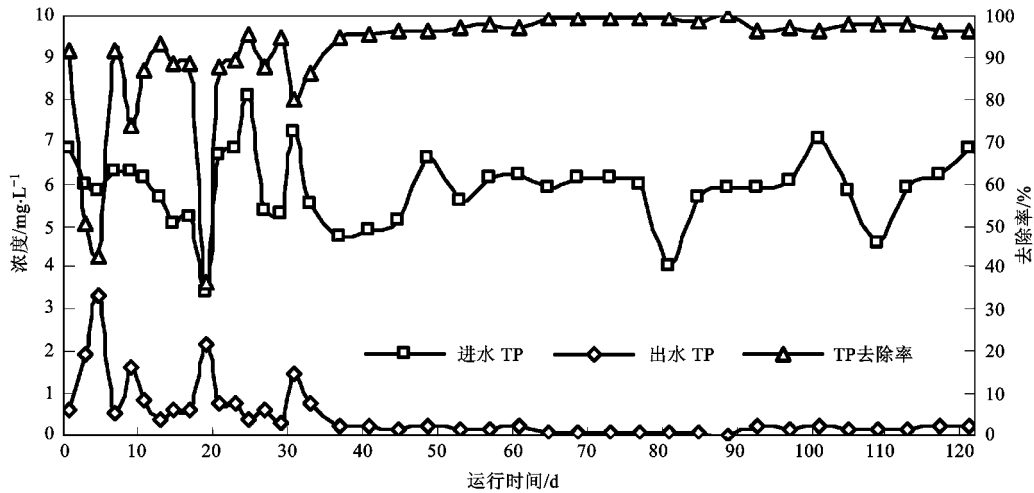


图2 进出水 TP 变化与 TP 去除率

Fig.2 Variations of TP and TP removal efficiency

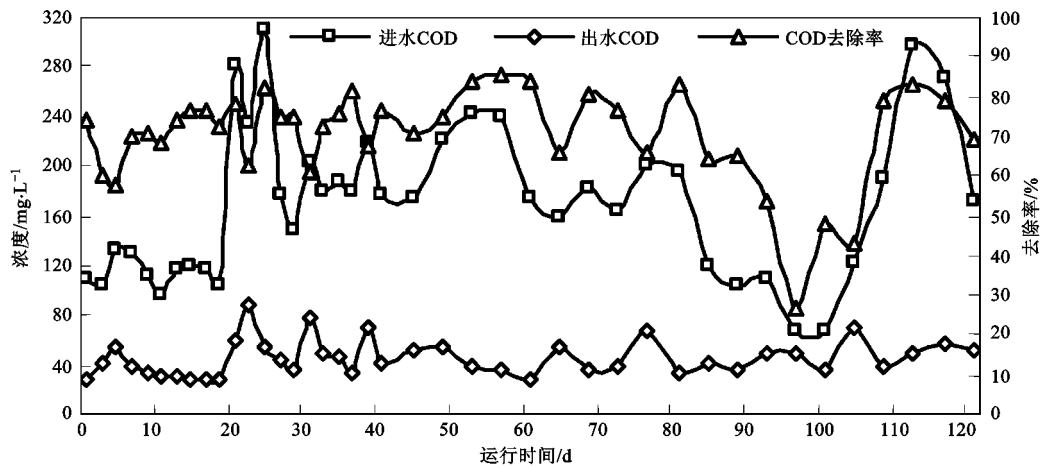
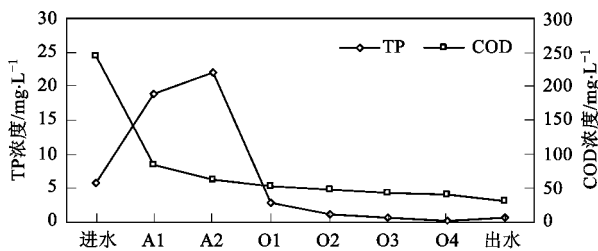


图3 进出水 COD 变化与 COD 去除率

Fig.3 Variations of COD and COD removal efficiency

mg/L, COD 为 245.4 mg/L, 在前 2 个厌氧格室, TP 分别升至 18.9 mg/L 和 22.0 mg/L, COD 分别降为

84.5 mg/L 和 61.7 mg/L. 伴随着水中 COD 的大量去除, 反应器出现高效厌氧释磷现象. 进入后 4 个好氧格室, TP 逐渐降低, 好氧末端为 0.2 mg/L, 厌氧释磷完全使得好氧吸磷动力较强, 吸磷彻底, 同时 COD 也得到少量去除, 好氧末端为 40.3 mg/L. TP 出水略有升高, 其值为 0.4 mg/L, 是由于二沉池少量释磷所致.



A1 ~ A2 为 A/O 反应器第 1 ~ 2 厌氧格室,

O1 ~ O4 为 A/O 反应器第 1 ~ 4 好氧格室

图4 稳态运行时 TP 和 COD 的沿程变化情况

Fig.4 Variations of TP and COD in flow pathway during stable operation period

2.2 半亚硝化反应器运行情况

2.2.1 进出水三氮变化

进出水三氮变化如图 5 所示, 亚硝化反应器进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 平均在 50 mg/L 左右, 而 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 基本上在 1 mg/L 以内. 出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 比较稳定, 二者浓度比例在 1.0 左右. 随着运行时间的推移, 二者出水浓度由启动初期的 20 mg/L 降为反

应后期的 10 mg/L 左右, TN 去除率达到 50%, 推测为反应器中发生了其他反应(主要为厌氧氨氧化)产生的综合作用所致. 出水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在整个试验期间

逐渐降低, 由起初的 > 5 mg/L 逐渐减至 1 mg/L 以下, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 累积率则相应地稳步上升, 在 75% ~ 96% 范围内变化.

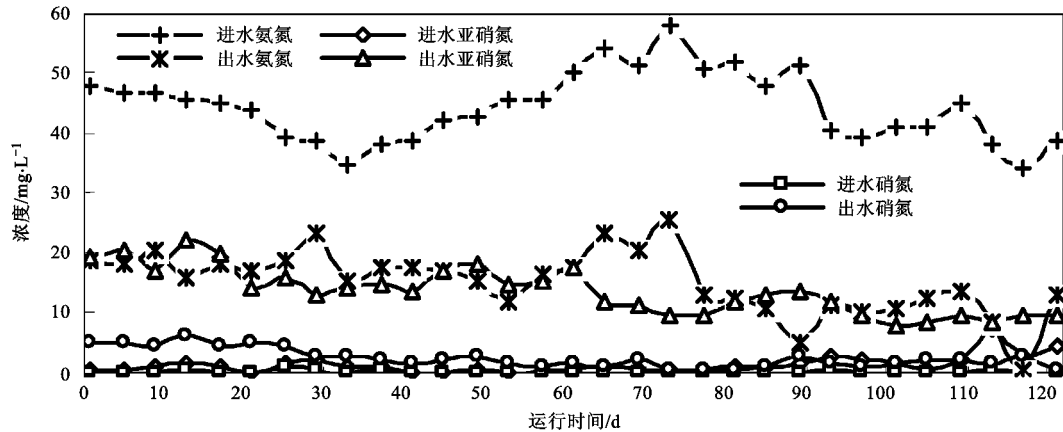


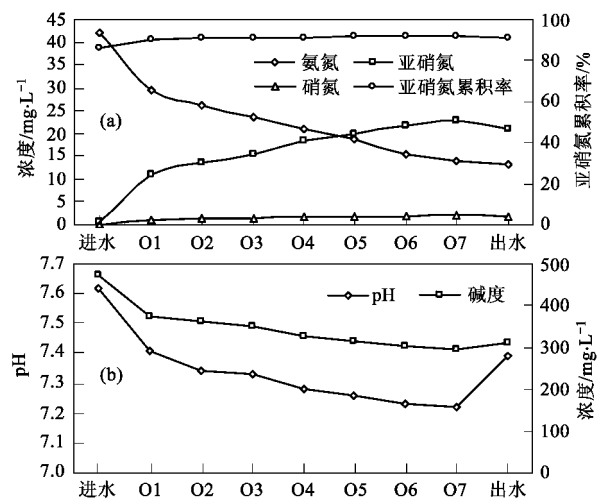
图5 进出水三氮变化关系

Fig. 5 Variations of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ and $\text{NO}_3^- \text{-N}$

本试验半亚硝化反应器控制 $\text{DO} < 0.2 \text{ mg/L}$, HRT 为 4.6 h, MLSS 均值为 4 600 mg/L, 通过接种混合污泥, 实现了稳定的半亚硝化并得以维持. 低 DO 对 NOB 的抑制可用基质缺乏竞争原理来解释, 硝化反应是一个双基质限制反应, 除游离氨外, DO 也是 AOB 代谢的必要底物. 由于城市污水氨氮浓度较低, 因此通过 DO 基质缺乏竞争途径成为主要控制手段. Hanaki 等^[10, 11] 研究表明, 低溶解氧基质条件下 AOB 增殖速率加快, 补偿了由于低氧造成的代谢活性下降, 使得整个硝化阶段中氨氧化未受到明显影响, 而 NOB 受到明显抑制, 从而造成亚硝酸盐的大量积累.

2.2.2 稳态运行时的沿程参数变化

试验稳态运行第 60 d 时, 沿程取样分析, 测得原水温度为 27.4℃, pH 值为 7.62, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度为 42 mg/L. 参数变化情况如图 6 所示. 原水进入第 1 个好氧格室, 经回流稀释与生化反应共同作用, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度分别为 29.4、10.9 和 1.2 mg/L, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 累积率为 90%. 混合液在各格室沿程推流过程中, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 逐渐降低, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 逐渐增加, 与 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 大幅增加相比, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 增幅较小. 同时, 反应器沿程 pH 值和碱度均下降, 碱度降幅与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 降幅比值为 6.26, 小于理论值 7.14, 可能是由于存在局部厌氧区域发生了 ANAMMOX(转化等量氨氮耗碱量较少) 或反硝化(产生碱度) 所致. 混合液至好氧末端格室, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度分别为 14.2、22.9 和



O1 ~ O7 为半亚硝化反应器的第 1~7 好氧格室

图6 稳态运行时沿程参数变化

Fig. 6 Parameter variations in flow pathway during stable operation period

2.2 mg/L, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 累积率为 91.4%.

2.3 ANAMMOX 反应器运行情况

2.3.1 进出水三氮变化

进出水三氮变化如图 7 所示, ANAMMOX 反应器 HRT 为 1.4 h, 进水 $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 约为 1.0, 初期二者浓度值为 20 mg/L 左右, 随着运行时间的推移, 二者浓度值逐渐降低, 后期稳定在 10 mg/L 左右, 进水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为 0.3 ~ 9.9 mg/L. 出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 得以等量去除, 二者浓度值基本都在 0.5 mg/L 以下, 出水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为 0.9 ~ 11.0 mg/L. 在进水

$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 相继过量的情况下,二者均能几乎完全去除,且 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 只有少量增加,说明发生 ANAMMOX 主体反应的同时,也伴随有其他反应的

发生(自养硝化反应、异养反硝化反应等),这也是混培系统具有的普遍特征,与所报道的试验现象一致^[12]。

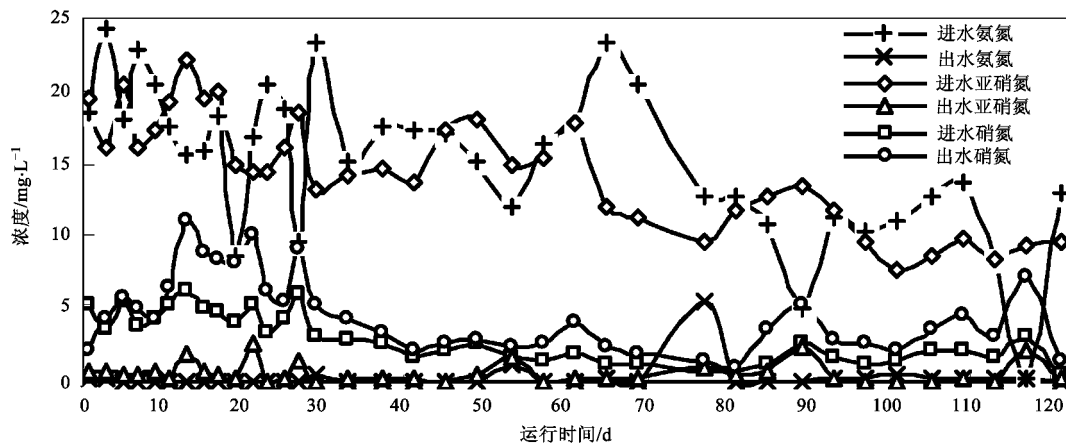


图7 进出水三氮变化关系

Fig. 7 Variations of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ and $\text{NO}_3^- \text{-N}$

2.3.2 进出水 TN 变化与 TN 去除率

进出水 TN 变化与 TN 去除率如图 8 所示,进水 TN 逐渐降低,由初始的 43.3 mg/L 降低为末期的 23.0 mg/L,而出水 TN 基本上都在 8 mg/L 以下, TN 去除率普遍都在 90% 以上,高于 ANAMMOX 88% 的理论 TN 去除率^[13],这是由于发生了反硝化,对 TN 去除有所贡献。厌氧氨氧化反应器 TN 去除负荷均值(以 N 计,下同)为 0.39 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$),最高为 0.57 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$),由于受到半亚硝化反应器出水水量限制, TN 去除负荷难以进一步提高。

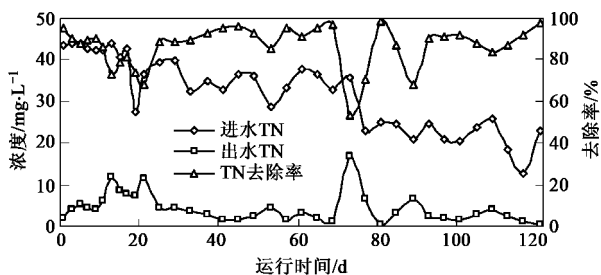


图8 进出水 TN 变化与 TN 去除率

Fig. 8 Variations of TN and TN removal rate

城市污水进水 COD/TN 均值为 3,由于本试验采用自养脱氮,使得在无外加碳源条件下也能高效去除总氮。ANAMMOX 进水 COD 为 40 ~ 50 mg/L,出水 COD < 30 mg/L, COD 去除率约 20%,经过 ANAMMOX 反应器严格的厌氧环境,一些难生化降解 COD 可能转化为易生化降解 COD,从而得到去

除。试验第 73 ~ 76 d,进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_2^- \text{-N}$ 高于 2.0,致使出水过剩氨氮较多,对 TN 去除产生很大影响,当进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_2^- \text{-N}$ 重新变为 1.0 左右时, TN 去除率也随之升高。

2.3.3 稳态运行时的沿程参数变化

试验稳态运行至第 52 d 时,对 ANAMMOX 柱进行沿程取样分析,参数变化情况如图 9 所示。沿程 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 成比例消耗,并伴随 TN 的去除和少量 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的产生。进水中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 经过约 1.2 m 反应柱高时已完成约 85% 的转化,其中 30 ~ 120 cm 反应柱高完成了约 60%。由此可见,试验反应器的 ANAMMOX 生物量并不是均匀分布的,而是主要分布在氮负荷较高的反应柱中下部。由于进水中携带一定的溶解氧,对 ANAMMOX 菌会产生一定的可逆性抑制^[14,15],因此,反应柱底部虽然进水氮负荷较高,但活性并不是最高的。这也可以

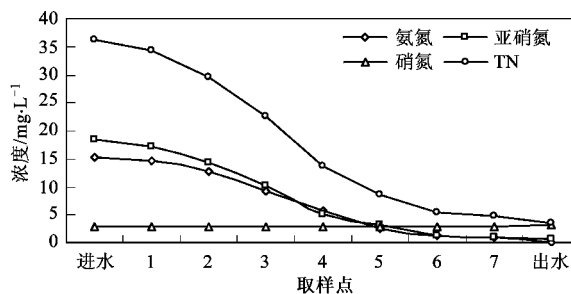


图9 稳态运行时沿程参数变化

Fig. 9 Parameter variations in flow pathway during stable operation period

从反应柱内 ANAMMOX 菌的颜色得到证实, 0 ~ 30 cm 柱段呈暗红色, 30 ~ 120 cm 柱段呈浅棕红色, 120 ~ 170 cm 柱段呈暗红色.

2.4 三污泥系统处理效能

聚磷菌、氨氧化菌和 ANAMMOX 菌均在各自独立反应器中适宜条件下生存, 避免了相互干扰, 优化了污泥种群, 提高了各工艺单元的处理效率, 使得城市污水的自养脱氮和强化生物除磷得以同时实现. 三污泥系统出水 COD、TN、TP 与 COD、TN、TP 去除率如图 10 所示, 出水 COD、TN 和 TP 分别在 30、8 和 0.5 mg/L 以下, 均达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 排放标准. COD 去除率均值为 85%, 最高达到了 94.4%; TN 去除率均值为 90.8%, 最高达到了 96.1%; TP 去除率均值为 95.3%, 最高达到了 98.3%. 原水中可生化降解 COD 主要被厌氧释磷所利用, 剩余少量 COD 经好氧化去除, 另外, 在 ANAMMOX 反应器中, COD 也得到 20% 左右转化降解, 使得出水 COD ≤ 30 mg/L, 低于传统脱氮除磷工艺出水 COD 值. 由于采用半亚硝化-ANAMMOX 工艺自养脱氮, 只需将一半的氨氮转化为亚硝酸盐氮, 而且无需硝化液回流, 与传统生物脱氮除磷工艺相比, 节省至少 50% 以上的曝气量和回流动力消耗, 降低了污水处理厂的运行成本.

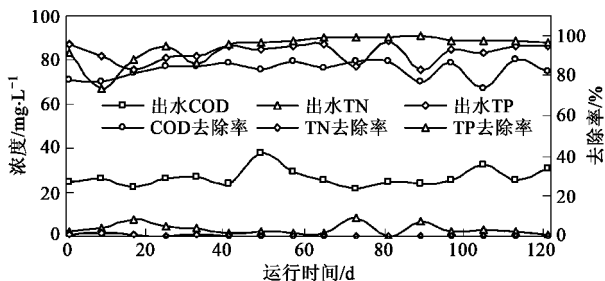


图 10 三污泥系统出水 COD、TN、TP 与 COD、TN、TP 去除率

Fig. 10 Effluent COD, TN and TP and removal efficiencies in three-sludge system

3 三污泥系统应用前景分析

三污泥系统运用新的工艺组合模式, 采取流程优化措施, 先进行高效除磷和降解有机物, 为半亚硝化-ANAMMOX 创造了良好的生化环境, 成功实现了城市污水的自养脱氮. 有效解决了系统中由于碳源不足而造成的脱氮除磷不能兼顾的问题, 同时减少了 CO₂ 的排放, 降低了动力消耗, 有利于节能减排和实现水资源的健康可持续发展.

本试验三污泥系统在小试研究中取得了一定的成果, 初步证明其实际应用具有一定的可行性. 但要推广到实际应用, 笔者认为还需在以下方面进一步研究: ①通过污水或污泥厌氧产甲烷实现能源回收利用, 为 ANAMMOX 反应器提供热源; ②考察常温条件下运行 ANAMMOX 反应器的效果、机制及强化脱氮能力的技术手段 (高氨氮废水常温自养脱氮的研究最近已有报道^[16, 17]), 以期使三污泥系统更接近于实际工程应用; ③确定各处理单元最佳运行工况和相应微生物最优的生存条件, 为设备选型和反应器设计提供依据.

4 结论

(1) A/O 除磷系统 HRT 为 3.6 h, TP 去除率 $\geq 95\%$; 半亚硝化系统 HRT 为 4.6 h, 在常温、DO < 0.2 mg/L 条件下实现了亚硝氮累积率为 75% ~ 96% 的半亚硝化; ANAMMOX 系统 HRT 为 1.4 h, COD 去除率约 20%, TN 去除率 $\geq 90\%$, TN 去除负荷均值为 0.39 kg/(m³·d), 最高达到 0.57 kg/(m³·d).

(2) 在原水 COD/TN 平均值为 3, 无外加碳源条件下, 由于该三污泥系统实现了自养脱氮, 原水碳源仅用于生物除磷, 成功解决了脱氮与除磷争夺碳源的矛盾, 系统处理出水 COD ≤ 30 mg/L、TN ≤ 8 mg/L、TP ≤ 0.5 mg/L, 出水水质优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 排放标准.

(3) 本试验半亚硝化-ANAMMOX 自养脱氮工艺处理城市污水, 只将一半氨氮氧化为亚硝氮, 与传统脱氮工艺相比, 节省至少 50% 以上的曝气量, 无需硝化液回流, 减少了动力消耗, 降低了污水处理厂的运行成本. 三污泥系统在小试研究中取得一定成果, 但要实际应用到城市污水处理, 还需进一步深入探讨与研究.

参考文献:

- [1] Ma Y, Peng Y Z, Wang X L. Improving nutrient removal of the AAO process by an influent bypass flow by denitrifying phosphorus removal [J]. Desalination, 2009, 246 (30): 534-544.
- [2] Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two sludge system [J]. Water Res, 1996, 30 (7): 1702-1710.
- [3] 张树军, 彭永臻, 王淑莹, 等. 城市生活垃圾晚期渗滤液中氨氮的常温短程去除 [J]. 化工学报, 2007, 58 (4): 1042-

- 1047.
- [4] Gut L , Plaza E , Hultman B. Assessment of a two-step partial nitrification/Anammox system with implementation of multivariate data analysis [J]. *Chemom Intell Lab Syst* , 2007 , **86** (1) : 26-34.
- [5] Van Dongen U , Jetten M S M , Van Loosdrecht M C M. The SHARON-ANAMMOX process for treatment of ammonium rich wastewater [J]. *Water Sci Technol* , 2001 , **44** (1) : 153-160.
- [6] Kim D J , Lee D L , Keller J. Effect of temperature and free ammonia on nitrification and nitrite accumulation in landfill leachate and analysis of its nitrifying bacterial community by FISH [J]. *Bioresour Technol* , 2006 , **97** (3) : 459-468.
- [7] Chae K J , Rameshwar T , Jang A , *et al.* Analysis of the nitrifying bacterial community in Biocube sponge media using fluorescent in situ hybridization (FISH) and microelectrodes [J]. *J Environ Manage* , 2008 , **88** (4) : 1426-1435.
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版) 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [9] Rodgers M , Wu G X. Production of polyhydroxybutyrate by activated sludge performing enhanced biological phosphorus removal [J]. *Bioresour Technol* , 2010 , **101** (3) : 1049-1053.
- [10] Hanaki K , Wantawin C , Ohgaki S. Nitrification at low levels of dissolved oxygen with and without organic loading in suspended-growth reactor [J]. *Water Res* , 1990 , **24** (3) : 297-301.
- [11] Terada A , Lackner S , Tsuneda S , *et al.* Redox-stratification controlled biofilm (ReSCoBi) for completely autotrophic nitrogen removal: The effect of co-versus counter-diffusion on reactor performance [J]. *Biotechnol Bioeng* , 2007 , **97** (1) : 40-51.
- [12] 周少奇. 厌氧氨氧化与反硝化协同作用化学计量学分析 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)* , 2006 , **34** (5) : 34-37.
- [13] Strous M , Van Gerven E , Zheng P. Ammonia removal from concentrated waste streams with the ANAMMOX process in different reactor configurations [J]. *Water Res* , 1997 , **31** (18) : 1955-1962.
- [14] Jubany I , Lafuente J , Juan A , *et al.* Total and stable washout of nitrite oxidizing bacteria from a nitrifying continuous activated sludge system using automatic control based on oxygen uptake rate measurements [J]. *Water Res* , 2009 , **43** (11) : 2761-2772.
- [15] Liu S T , Yang F L , Xue Y , *et al.* Evaluation of oxygen adaptation and identification of functional bacteria composition for ANAMMOX consortium in non-woven biological rotating contactor [J]. *Bioresour Technol* , 2008 , **99** (17) : 8273-8279.
- [16] Dosta J , Fernandez I , Vazquez-Padin J R , *et al.* Short-and long-term effects of temperature on the ANAMMOX process [J]. *J Hazard Mater* , 2008 , **154** (1-3) : 688-693.
- [17] Vazquez-Padin J , Fernandez I , Figueroa M , *et al.* Applications of ANAMMOX based processes to treat anaerobic digester supernatant at room temperature [J]. *Bioresour Technol* , 2009 , **100** (12) : 2988-2994.