

A₂N/BAF 组合工艺深度除磷脱氮研究

李 继¹, 吕小梅¹, 董文艺¹, 张真江¹, 范 翊², 王维康²

(1. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院环境科学与工程研究中心, 518055 广东 深圳, lij99@gmail.com;

2. 深圳市利源水务设计咨询有限公司, 518031 广东 深圳)

摘 要: 针对我国南方低碳氮比生活污水,开展以 BAF 为硝化单元的 A₂N 工艺小试研究,针对超越污泥携带 NH₄⁺ 导致出水超标及二沉池出水 SS 偏高时 TP 超标问题,进一步研究增加二级 BAF 单元的处理效果,形成 A₂N/BAF 工艺. 结果表明:A₂N 段对 COD、NH₄⁺-N、TP 平均去除率分别为 82.0%、70.9%、90.0%;当进水 NH₄⁺-N 超过 40.0 mg/L 时,二沉池出水 NH₄⁺-N 超过 10.0 mg/L;二级 BAF 单元能够硝化二沉池出水 NH₄⁺-N 及截留 SS,最终出水 COD、TP、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、SS 平均质量浓度分别为 35、0.35、1.06、8.01、7 mg/L,稳定达到一级 A 标准.

关键词: 低碳氮比;双污泥工艺;反硝化除磷;曝气生物滤池;启动

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)02-0080-05

Study on combined A₂N/BAF process for advanced nitrogen and phosphate removal

LI Ji¹, LÜ Xiao-mei¹, DONG Wen-yi¹, ZHANG Zhen-jiang¹, FAN Yi², WANG Wei-kang²

(1. Environmental Science and Engineering Research Center, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, 518055 Shenzhen, Guangdong, China, lij99@gmail.com; 2. Shenzhen Liyuan Water Design & Consultation Co. Ltd., 518031 Shenzhen, Guangdong, China)

Abstract: The A₂N process with BAF as a nitrification unit was researched aiming at the low carbon and nitrogen ratio domestic wastewater in southern China. According to the problems that effluent ammonia exceeded the standard because of the ammonia carried in surpass sludge and total phosphate couldn't reach the discharge standard when SS of secondary settling tank was high, a secondary BAF was set up, and the total treatment effect of A₂N/BAF process was studied. Results showed that the average removal rates of COD, ammonia and TP of A₂N stage were 82.0%, 70.9% and 90.0%, respectively. Effluent ammonia concentration of secondary settling tank exceeded 10 mg/L when influent was more than 40 mg/L. Average concentration of COD, TP, ammonia, nitrate and SS in final effluent were 35, 0.35, 1.06, 8.01 and 7 mg/L, respectively, which had satisfied the A-level of the national standards.

Key words: low carbon/nitrogen ratio; A₂N; denitrifying phosphate removal; biological aerated filter (BAF); start-up

我国南方城市污水具有低碳氮比特征,导致污水厂脱氮和除磷功能不足. 近年来,反硝化除磷理

论引起广泛关注^[1-3],基于该理论,A₂N 工艺将硝化菌与反硝化聚磷菌置于相互独立的污泥系统,克服了单污泥法中硝化菌与好氧聚磷菌最佳 SRT 之间的矛盾,获得适宜的生长环境^[4-5]. 反硝化聚磷菌体内储存的碳源 (PHB) 同时用于反硝化和聚磷,解决了低碳氮比污水脱氮除磷碳源不足的难题^[6]. A₂N 工艺可以节省 50% 碳源和 30% 曝气量,减少

收稿日期: 2010-09-16.

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAB17B04, 2006BAB17B06); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07317-02); 深圳市科技计划项目(SG200810130012A); 深圳市南山区科技研发资金(南科院 2008006).

作者简介: 李 继(1973—),男,副教授;
董文艺(1967—),男,教授,博士生导师.

50% 的剩余污泥^[7-8],具有节能降耗的特点^[9-11]. A₂N 工艺需要克服的两个问题是超越污泥携带氨氮易导致最终出水氨氮超标、二沉池出水 SS 易导致总磷超标. 尽管调节适宜的超越污泥量可以降低二沉池出水氨氮质量浓度,提高系统的脱氮效果^[12],但进水氨氮超过一定质量浓度,降低超越污泥量仍然难以保证系统出水稳定性.

本研究针对我国南方低碳氮比生活污水,开展以 BAF 为硝化单元的 A₂N 工艺小试研究,针对超越污泥携带氨氮导致出水超标及二沉池出水 SS 偏高时总磷超标的问题,提出了 A₂N/BAF 组合工艺,对其除磷脱氮效能进行了研究.

1 试 验

1.1 工艺流程与试验装置

设计处理能力为 70 L/h. 工艺流程如图 1 所

示,包括具有除磷脱氮功能的 A₂N 段与二级硝化段. A₂N 段包括厌氧池、中沉池、一级 BAF、缺氧池、二沉池, HRT 分别为 1.0、1.5、2.0、3.5 和 1.5 h. 需特别说明的是,缺氧池包含 3 段,即前置厌氧段、缺氧段和后曝气段, HRT 分别为 0.5、2.5 和 0.5 h, 为便于论述统称缺氧池. 超越污泥由中沉池进入缺氧池的前置厌氧段,之后进入缺氧段和后曝气段;二沉池回流污泥回流至厌氧池. 二级硝化段也采用 BAF,即二级 BAF 段, HRT 为 0.5 h.

装置由有机玻璃与不锈钢制成;一级、二级 BAF 均采用陶粒填料(粒径 3~5 mm),柱高分别为 4.0、2.0 m,填料高度为 3.0、1.0 m,气水比为 3:1 和 1:1. 厌氧池和缺氧池内安装搅拌器.

1.2 试验水质

试验用水为深圳某大学校区内生活污水,试验水质见表 1 所示.

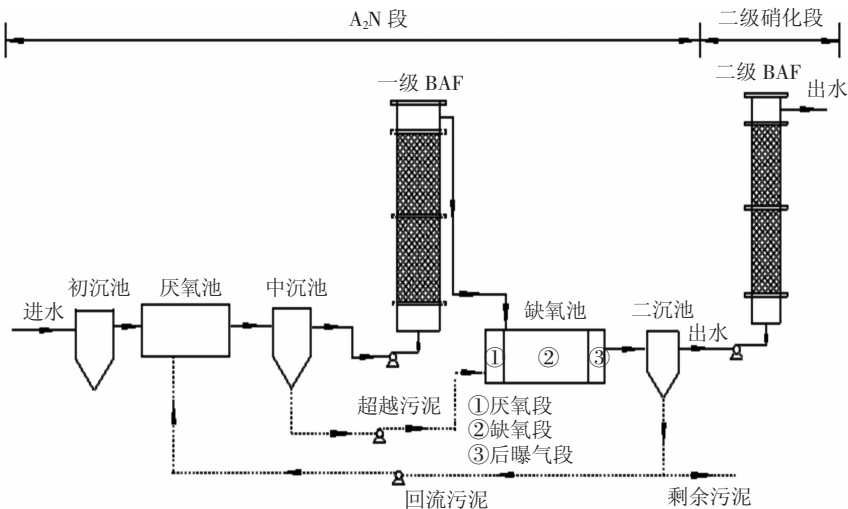


图 1 A₂N/BAF 工艺流程图

表 1 进水水质

项目	COD	BOD ₅	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{TP})$	碱度
范围	114~274	64~150	15.6~52.2	0~1.05	20.9~60.4	1.41~5.30	155.0~280.6
平均值	204	126	34.3	0.36	40.9	4.40	195.4

1.3 检测方法

COD:重铬酸钾法;NH₄⁺-N:纳氏试剂分光光度法;NO₃⁻-N:紫外分光光度法;TN:过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;TP:钼锑抗分光光度法;MLSS:滤纸称重法;SS:HACH DR/890.

2 系统启动

2.1 污泥培养

系统启动涉及到硝化菌和反硝化聚磷菌的驯化,试验接种污泥取自深圳市罗芳污水处理厂(A²/O 工艺)二沉池回流污泥.

硝化菌直接在曝气生物滤池中驯化,加入生活污水和接种污泥后闷曝,每天换水两次,连续闷曝 3 d. 之后采取小流量连续进水,逐步增大进水量,10 d 后达到设计流量 70 L/h 运行. 定期检测进、出水 NH₄⁺-N 以及生物相观察. 经过半个月的驯化, NH₄⁺-N 的去除率达 78%. 生物膜观察结果显示:底部进水区所生长的生物膜多且显深黄色,显微镜观察生物膜中多以菌胶团为主,原生动物只有线虫;中上部生物膜的颜色较浅,呈淡黄色,生物膜中有大量的钟虫、草履虫、变形虫、轮虫、及大量的线状细菌. 至此,认为挂膜成功.

反硝化聚磷菌的培养直接在系统中采用厌氧/缺氧方式进行,将接种污泥加入系统,在设计流量下运行.通过蠕动泵向缺氧段投加适量硝酸钠溶液以提供电子受体 NO_3^- -N, NO_3^- -N质量浓度以缺氧段进水TP质量浓度的2.0~2.5倍进行投加,并根据缺氧段出水TP与 NO_3^- -N质量浓度适量增减硝酸钠投加量.经过27 d的驯化,TP去除率高于80%,认为反硝化聚磷菌已经培养成功.

2.2 系统启动

经过27 d的培养驯化后,硝化污泥和反硝化聚磷污泥驯化完成,连接两系统,开始 A_2N 工艺的连续运行,运行第51天时开始二级BAF的启动和运行.稳定运行期间厌氧池和缺氧池中MLSS维持在2 000~2 500 mg/L,SRT维持30 d左右.

3 实验结果与讨论

3.1 A_2N 段COD的去除效果

A_2N 段主要单元COD变化如图2所示,进水COD为114~274 mg/L,平均值为204 mg/L,出水COD为18~67 mg/L,平均值为42 mg/L,平均去除率为82.0%.

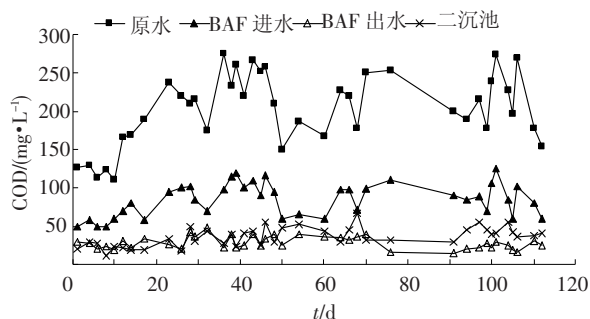


图2 A_2N 段主要单元COD变化

厌氧池及一级BAF为去除COD的主要单元.厌氧池对COD的平均去除量约占总去除量的49.2%,在厌氧段,颗粒有机物及胶体进行水解生成溶解性的有机物,反硝化聚磷菌大量吸收水中溶解性的有机物合成体内聚合物,为反硝化超量吸磷储备碳源.BAF单元对COD的去除主要是对有机物的碳化以及部分颗粒有机物的截留,BAF出水COD为16~48 mg/L,该单元对COD去除量约占总去除量的34.0%.厌氧池已去除大部分有机物,降低了BAF进水有机物质量浓度,有利于抑制异养菌与硝化菌的竞争,提高硝化效果.

3.2 A_2N 段脱氮效果

A_2N 段 NH_4^+ -N质量浓度变化如图3所示,进水 NH_4^+ -N为15.6~52.2 mg/L,平均值为34.3 mg/L.由于厌氧池内二沉池回流液的稀释,

进入BAF的 NH_4^+ -N质量浓度略有降低.经过BAF硝化, NH_4^+ -N出水为0~7.40 mg/L,平均出水为3.36 mg/L,平均去除率为88.9%.由于中沉池至缺氧池的超越污泥携带的 NH_4^+ -N在后续处理中不能继续被去除,导致二沉池出水 NH_4^+ -N反而升高,且二沉池出水 NH_4^+ -N随进水 NH_4^+ -N质量浓度变化波动较大.二沉池出水为4.48~23.1 mg/L,平均值为10.3 mg/L,系统 NH_4^+ -N平均去除率为70.9%.

以BAF为硝化单元, NH_4^+ -N去除效果稳定.运行第20天后,进水 NH_4^+ -N增加至30.7~52.2 mg/L,BAF出水 NH_4^+ -N略有增加,但BAF硝化效果基本稳定在85.6%以上.

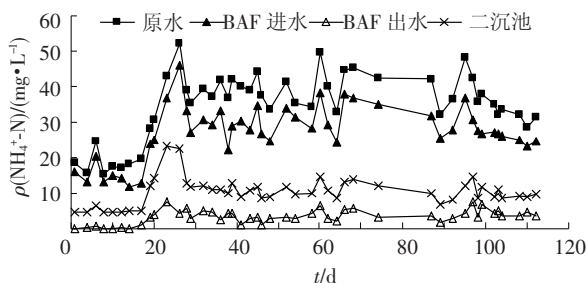


图3 A_2N 段主要单元 NH_4^+ -N变化

A_2N 段 NO_3^- -N质量浓度变化如图4所示,进水 NO_3^- -N质量浓度非常低,平均质量浓度为0.36 mg/L.经过BAF单元的硝化作用, NO_3^- -N质量浓度明显增大,平均为28.5 mg/L.在缺氧段,反硝化聚磷菌以 NO_3^- 为电子受体吸磷, NO_3^- 被还原去除.从图4可以看出,缺氧段出水 NO_3^- -N质量浓度基本都低于0.50 mg/L,脱氮较为彻底.

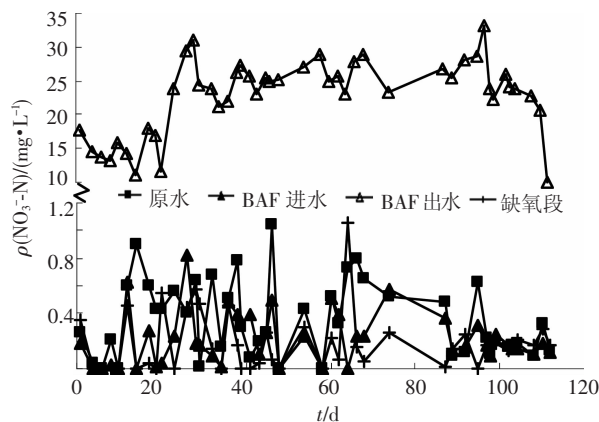


图4 A_2N 段主要单元 NO_3^- -N变化

A_2N 段主要单元 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N以及TN的平均质量浓度变化如图5所示.经过一级BAF处理, NH_4^+ -N被转化成 NO_3^- -N,而TN质量浓度基本不变.可以看出,一级BAF出水TN低于原水,主要是由于二沉池回流液的稀释作用.在缺氧段

NO₃⁻-N 被反硝化脱除,实现系统脱氮.然而,由于中沉池至缺氧池的超越污泥携带NH₄⁺-N,导致缺氧池内NH₄⁺-N 与 TN 质量浓度仍较高.

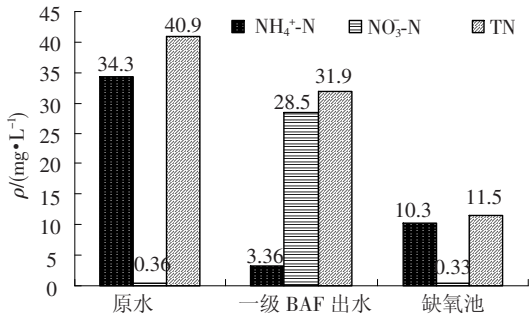


图5 A₂N 段NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 及 TN 的变化

3.3 A₂N 段除磷效果

A₂N 段除磷效果如图6所示.进水 TP 为 1.41 ~ 5.30 mg/L,平均为 4.40 mg/L,二沉池出水范围为低于检测限至 1.44 mg/L,平均 0.47 mg/L,平均去除率为 90.0%.厌氧池中反硝化聚磷菌进行释磷,TP 质量浓度升高至平均 7.71 mg/L.在缺氧池的前置厌氧段 TP 质量浓度继续升高至平均 9.01 mg/L.在缺氧段,反硝化聚磷菌超量吸磷,出水 TP 为 0.11 ~ 1.46 mg/L,平均为 0.53 mg/L.经过后曝气段的好氧吸磷作用,二沉池出水 TP 降至 0 ~ 1.44 mg/L (0 表示低于检测线),平均为 0.47 mg/L.

缺氧池的前置厌氧段发生进一步释磷作用,平均释磷量为 1.30 mg/L,然而该厌氧段进、出水 COD 基本没有发生变化,可能是厌氧池中污泥吸附的颗粒有机物及胶体在缺氧池的厌氧段进一步水解产生可利用碳源,反硝化聚磷污泥利用该碳源进一步释磷.该段的作用尚需进一步研究.

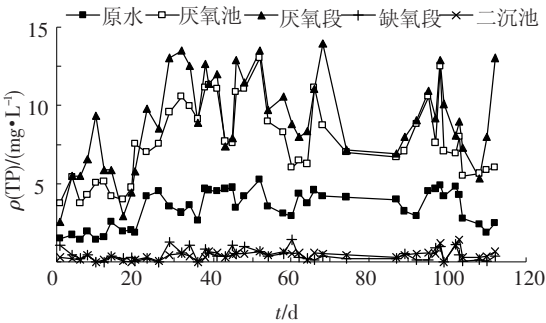


图6 A₂N 段主要单元 TP 变化

虽然二沉池出水 TP 质量浓度较低,平均质量浓度低于 0.5 mg/L,但存在波动,造成 TP 超过 0.5 mg/L.进一步分析表明,SS 是造成 TP 超标的主要原因.由于小试装置存在一定的污泥絮体漂浮现象并随上清液流出,导致部分时间出水 SS 偏

高.出水 TP 与 SS 线性相关,如图7所示.SS 越低,出水 TP 越低,当出水 SS 低于 10 mg/L 时,TP 即可稳定达标.

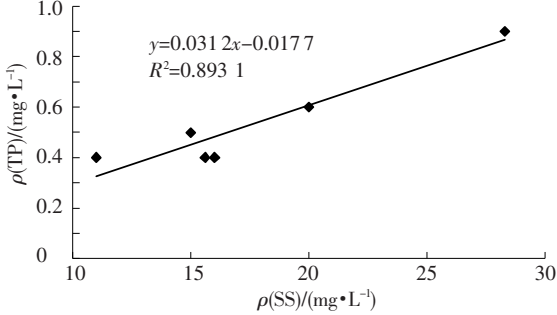


图7 二沉池出水 SS 与 TP 的关系

3.4 二级 BAF 运行效果

根据 A₂N 段运行研究发现,当进水NH₄⁺-N 质量浓度较高时,通过超越污泥进入缺氧池并最终进入二沉池的NH₄⁺-N 随之增大.当进水质量浓度超过一定范围,即使降低超越污泥量仍然难以保证出水NH₄⁺-N 达标.另外,根据出水 SS 与 TP 的关系可知,当二沉池出水 SS 较高时,出水 TP 质量浓度不能够稳定达标.针对这些问题,提出在双污泥工艺基础上增加二级 BAF 单元,一方面可以硝化出水中的NH₄⁺-N,另一方面可以截留水中的 SS,保证出水 SS 与 TP 质量浓度均能够稳定达标.因此,对 A₂N 段之后增加的二级硝化 BAF 单元,即二级 BAF 的运行效果进行了研究.

二级 BAF 采用连续进水、自然挂膜的方式, HRT 为 30 min. 二级 BAF 出水 COD、NH₄⁺-N 与 NO₃⁻-N 质量浓度变化如图8所示.

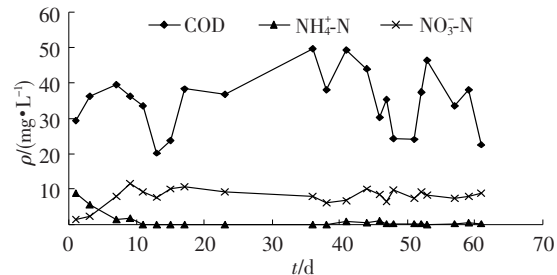


图8 二级 BAF 出水 COD、NH₄⁺-N 与 NO₃⁻-N 质量浓度变化

出水 COD 为 20 ~ 50 mg/L,平均值为 35 mg/L.运行前 7 天,出水NH₄⁺-N 质量浓度逐渐降低,之后基本稳定在 0.5 mg/L 以下,平均为 1.06 mg/L.尽管气水比仅为 1:1,二级 BAF 仍然具有非常高的硝化效果.出水NO₃⁻-N 质量浓度逐渐增大,最后稳定在 6.20 ~ 11.53 mg/L,平均值为 8.01 mg/L.

图9 为二级 BAF 出水 TP 与 SS 变化.可以看

出,出水 TP 基本低于 0.5 mg/L,平均为 0.35 mg/L.运行期间,仅第 17、23 天时出水略高,为 0.60、0.51 mg/L.出水 SS 为 5~9 mg/L,平均值为 7 mg/L,已经达到较低水平.

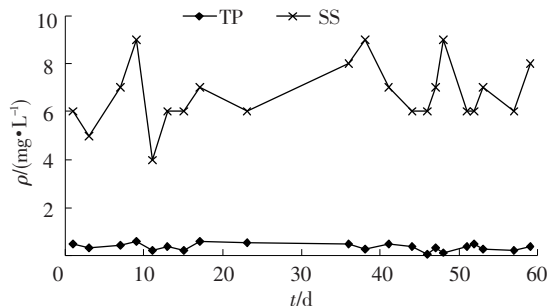


图9 二级 BAF 出水 TP、SS 变化

由图 8、9 可知,经过二级 BAF 处理, COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 及 SS 进一步得到有效去除,出水已达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)一级 A 标准.二级 BAF 的设置有效提高了出水水质,保证了系统出水达标的稳定性.

4 结 论

1)提出了 A_2N /BAF 工艺,为低碳氮污水处理达标(一级 A)提供了技术选择.

2) A_2N 段对 COD 的平均去除率为 82.0%,厌氧池与一级 BAF 去除量分别占总去除量的 49.2%与 34.0%;厌氧池内污泥通过对 COD 的吸收转化,保存了原水中的碳源,避免了硝化单元对碳源的无效损耗.

3)硝化由一级 BAF 完成,去除率为 88.9%,但是厌氧池污泥携带 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 超越硝化单元,导致 A_2N 段出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 较高,二沉池出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 达 10.3 mg/L,约超过一级 A 标准 1 倍.

4) A_2N 段除磷效率达 90.0%,但二沉池出水 TP 与 SS 相关,当 SS 高于 15 mg/L 时,出水 TP 不达标.

5)二级 BAF 单元具有多重功能:进一步硝化,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均质量浓度为 1.06、8.01 mg/L;截留二沉池出水 SS、降低出水 TP,出水 SS、TP 平均为 7、0.35 mg/L;进一步降低 COD,保障 COD 稳定达标.

参考文献:

- [1] LACKO N, DRYSDALE G D, BUX F. Anoxic phosphorus removal by denitrifying heterotrophic bacteria [J]. Water Sci Tech, 2003, 47(11): 17–22.
- [2] TSUNE S, OHNO T, KOICHI, *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying phosphate accumulating organisms in a sequencing batch reactor [J]. Biochemical Engineering Journal, 2006, (27): 191–196.
- [3] CARVALHO G, LEMOS P C, OEHMEN A, *et al.* Denitrifying phosphorus removal: linking the process performance with the microbial community structure [J]. Water Res, 2007(41): 4383–4396.
- [4] LI Xiangkun, HUANG Rongxin, BAO Linlin, *et al.* Simultaneous phosphorus and nitrogen removal in a continuous-flow two-sludge system[J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(1): 52–57.
- [5] 杨庆娟,王淑莹,刘莹,等. A_2N 双污泥反硝化除磷系统微生物的先间歇后连续培养及快速启动[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2249–2253.
- [6] 荣宏伟,彭永臻,张朝升. 低碳城市污水反硝化除磷试验[J]. 环境工程, 2008, 26(1): 11–14.
- [7] KUBA T, LOOSDRECHT van 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.
- [8] SHOJI T, SATOH H, MINO T. Quantitative estimation of the role of denitrifying phosphate accumulating organisms in nutrient removal [J]. Water Sci Technol, 2003, 47(11): 23–29.
- [9] 王亚宜,彭永臻,李探微. A_2N 连续流双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, 34(8): 1046–1049.
- [10] LIU Hongbo, SUN Liping, XIA Siqing. An efficient DPB utilization process: the modified A_2N process [J]. Biochemical Engineering Journal, 2008, 38: 158–163.
- [11] 袁昊,吕锡武,徐微. 双污泥反硝化除磷工艺处理生活污水的中试研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(17): 28–30.
- [12] 杨庆娟,王淑莹,刘莹,等. 污泥回流比对 A_2N 反硝化除磷工艺脱氮除磷的影响[J]. 中国给水排水, 2008, 24(13): 37–41.

(编辑 刘 彤)