

强化内源反硝化脱氮及污泥减量化研究

王建龙, 彭永臻*, 高永青, 王淑莹, 高春娣

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022)

摘要: 为提高传统污水处理工艺内源反硝化脱氮效率, 在系统内部实现污泥减量, 设计了水解酸化/缺氧/好氧(H/A/O)生物脱氮及污泥减量化工艺. 试验采用连续流处理装置, 以实际生活污水为研究对象. 结果表明, 在进水 COD (220 ~ 410 mg/L)、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ (36 ~ 58 mg/L)、总水力停留时间为 11 h、硝化液回流比为 300%、无外加碳源和碱度条件下, COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 的平均去除率分别超过 90%、95% 和 75%. 在缺氧段碳源充足的条件下, 随着硝化液回流比的增加, 系统 TN 平均去除率升高; 当碳源不足时, 随着硝化液回流比的增加, 系统 TN 平均去除率降低. 污水经水解酸化预处理后, 反硝化速率大大升高. 水解酸化段利用水解酸化作用对回流剩余污泥的减量达到 56.2%, 污水、污泥经过水解酸化处理, 大大提高了系统脱氮效率. 以水解酸化作为传统的城市污水及污泥处理工艺, 既可有效地改善污水的可生化性, 提高系统污染物平均去除率, 增强污水处理系统运行的稳定性, 又可实现污水、污泥一体化处理.

关键词: 内源反硝化; 脱氮; 污泥减量化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)01-0134-05

Nitrogen Removal by Enhanced Endogenous Denitrification with Excess Activated Sludge Reduction Technology

WANG Jian-long, PENG Yong-zhen, GAO Yong-qing, WANG Shu-ying, GAO Chun-di

(School of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: In order to increase the efficiency of nitrogen removal by endogenous denitrification, and to realize the excess activated sludge reduction in the traditional wastewater treatment process, this investigation proposes a hydrolysis/anoxic/oxic (H/A/O) process utilizing nitrogen removal with excess activated sludge reduction. The experimental equipment for continuous treatment of domestic wastewater was set up and the pilot experiment was conducted. The results showed that, without adding external carbon sources and alkalinity, the removal efficiency of COD, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN were higher than 90%, 95% and 75%, respectively, under the condition that the hydraulic retention time was 10 h and the backflow ratio of nitrification liquor was 300%, the COD of influent between 220 ~ 410 mg/L, the $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ of influent between 36 ~ 58 mg/L. When the carbon source was not the limiting condition of the denitrification, with the increasing of the return nitrification liquor, the nitrogen removal efficiency increased. On the contrary, with the increasing of the return nitrification liquor, the nitrogen removal efficiency decreased. It has been tested that the reduction rate of excess activated sludge in the system reached 56.2%. The nitrogen removal efficiency was improved greatly by the wastewater and excess activated sludge hydrolysis. It's proved that using hydrolysis as pre-treatment of wastewater and excess activated sludge is feasible, thus it not only improved the biodegradability of wastewater and the nutrient removal efficiency, but also enhanced the stability for the operation of the wastewater treatment system, and then the wastewater and excess activated sludge were treatment simultaneously.

Key words: endogenous denitrification; nitrogen removal; sludge reduction

解决水体富营养化问题的关键是有有效去除污水中的氮和磷^[1,2]. 目前城市污水脱氮除磷广泛采用生物法, 主要的工艺有交替式氧化沟、A/O、A²/O、UCT、Bardenph、SBR 等^[3~5]. 尽管这些技术已经比较成熟, 但这些工艺在我国的推广应用中出现了不少问题, 其中问题之一是这些工艺是基于 C/N 较高的污水, 而我国城市生活水平较低, 实际污水的 C/N 低, 脱氮除磷过程中有机碳源不足, 结果导致脱氮除磷效率低下. 如西安某污水处理厂设计进水 BOD₅ 浓度为 180 mg/L, 实际进水一般为 100 ~ 120 mg/L. 因此, 尽管出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ < 5 mg/L, 但总氮及总磷的平均去除率仅为 30% ~ 40%^[6]. 可见, 碳源问题的解决与

否关系着脱氮除磷的效率能否提高. 有关研究发现一般活性污泥中的 40.5% 为总干物质, 其以液体高分子状态存在于细胞中, 由于细菌细胞壁难以破坏, 使活性污泥中的这类碳源无法利用^[7]. 剩余污泥中含有的碳水化合物(50.2%)、蛋白质(26.7%)、脂肪(20.0%)均属于慢速可生物降解碳源^[8], 如果将这些物质转化为易生物降解碳源用于脱氮系统, 则可

收稿日期: 2007-01-04; 修订日期: 2007-01-29

基金项目: 北京市自然科学基金项目(8042004); 北京市科委“863 计划”配套项目(Z0005186040421); 北京市科委国际合作项目; 北京市属市管高等学校人才强教“创新团队”项目

作者简介: 王建龙(1978 ~), 男, 博士, 主要研究方向为污水生物处理及其过程控制, E-mail: wjl-xt@163.com

* 通讯联系人, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

大大提高污水的生物脱氮效率,同时避免了外加碳源,节约运行费用。

本试验从提高处理效率和降低能耗这一基本观点出发,进行了城市污水中有机物与氮同时去除以及污水污泥一体化处理工艺研究。本研究以期为城市污水的高效低耗处理,特别是经济欠发达城市及中小城镇污水生物脱氮处理工艺的工程设计及改造提供有益的参考,同时也为高浓度有机工业废水的生物处理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 工艺流程

试验工艺流程如图 1 所示。其中水解酸化反应器有效容积为 21 L, HRT 为 3.5 h, 水解酸化采用升流式复合厌氧污泥床反应器(由悬浮污泥区、泥水分离区、生物膜强化区组成), 这既可利用水解对大分子有机基质的初级降解, 提高污水的可生化性并补充一定量的碳源, 又可通过水解过程消化掉一部分污泥, 减少系统剩余污泥量^[9-13]。缺氧反应器有效容积为 13 L, HRT 为 2 h, 反硝化前置既可以充分利用污水中的有机基质作为反硝化过程的电子供体, 又

可缓解有机负荷对后续硝化段的负面影响。好氧反应器有效容积为 36 L, HRT 为 5.5 h。整个系统通过水解酸化反应器排泥口排泥。

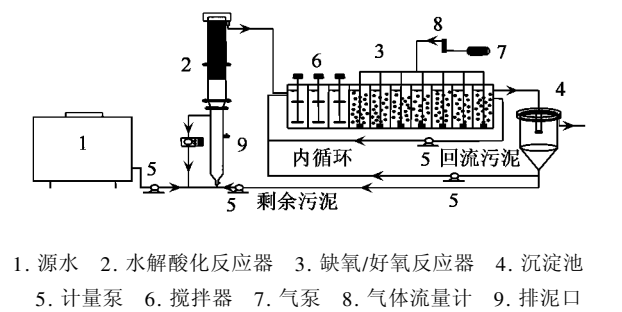


图 1 工艺流程

Fig.1 Treatment process

1.2 污水水质及检测方法

试验以北京某大学家属区的生活污水作为试验用水, 通过计量泵控制进水流量, 同时通过测定出水流量控制流量。试验运行期间环境温度为 23 ~ 25℃, 试验装置在常温下运行, SS、MLSS、MLVSS 测定采用重量法。生活污水的主要水质参数及测定方法见表 1。

表 1 污水水质及检测方法/mg•L⁻¹

Table 1 Main parameters of wastewater and analytical methods/mg•L⁻¹

项目	COD	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	PO ₄ ³⁻ -P	NO ₂ ⁻ -N	TOC/TN
生活污水(均值)	286	0.75	48	7	0.43	111/55
检测方法	5B-1 型 COD 快速测定仪	麝香草酚分光光度	纳氏试剂法	钼锑抗分光光度法	N-(1-萘基)-乙二胺光度法	Multi TOC/TN 3 000

1.3 工艺特点

强化内源反硝化脱氮及污泥减量化工艺是一种处理生活污水及可生化性较好的工业废水的方法, 是以污水和剩余污泥的水解酸化液作为反硝化碳源, 以缺氧/好氧(A/O)工艺为脱氮系统, 在提高系统脱氮效率的同时实现了污泥减量化、资源化的优化组合工艺。污水首先进入水解酸化反应器, 通过吸附、物理沉降和生物降解作用去除污水中颗粒性物质, 同时将污水中大分子和难降解物质转化为易降解和小分子物质, 提高污水的生化性, 从而提高后续工艺有机物去除效率, 降低能耗, 与此同时沉淀池的剩余污泥也进入水解酸化反应器, 污泥的水解酸化液作为后续脱氮所需碳源。水解酸化出水进入缺氧反应器, 与好氧段回流硝化液混合进行反硝化脱氮, 同时消耗大量 COD。缺氧段出水进入好氧段, 降解剩余的 COD, 并将污水中的氨氮在硝化菌的作用下

全部转化为硝态氮。好氧段出水进入沉淀池, 进行泥水分离, 上清液外排, 沉淀池底部污泥分别回流至水解酸化反应器和缺氧段。该工艺可提高污水脱氮效率, 减少污泥产量, 降低建设费用和运行成本。

2 结果与讨论

2.1 有机物去除效果

试验期间, 进水 COD(220 ~ 410 mg/L)、NH₄⁺-N(36 ~ 58 mg/L)属于典型的低 C/N 城市污水, 且浓度波动范围比较大, 但最终处理出水的 COD < 50 mg/L, 平均去除率超过 90%(图 2)。由此可以看出, 该处理系统对有机物具有稳定且较好的处理效果。系统的 3 个处理单元均对 COD 有一定的去除效果, 而且各阶段对有机物去除的贡献差别明显。对 COD 去除贡献最大的是反硝化阶段, 平均占 COD 去除总量的 50%左右, 去除比例最小的是硝化阶段, 特别

是试验后期, COD 的去除量不足总去除量的 20% . 系统对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除效果如图 3 所示. $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的进水浓度在 36 ~ 58 mg/L 之间, 出水浓度不超过 2 mg/L, 平均去除率均超过 95%, 而且处理效果受进水负荷影响比较小. 试验发现水解酸化阶段出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 高于进水, 这是由于在水解酸化过程中污水颗粒物中的有机氮发生了氨化反应, 使得部分有机氮转化为无机氮造成的. 为减少污水处理的运行费用, 试验期间没有外加碳源, 充分利用污水中原有的有机物作为反硝化的碳源. 试验期间出水 $\text{TN} \leq 15$, 去除率超过 75% .

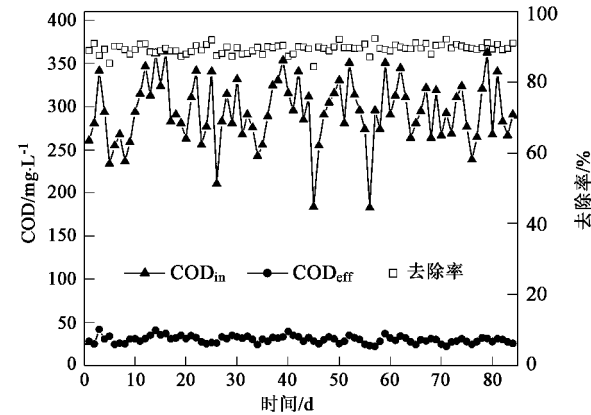


图 2 COD 去除效果
Fig.2 COD removal efficiency

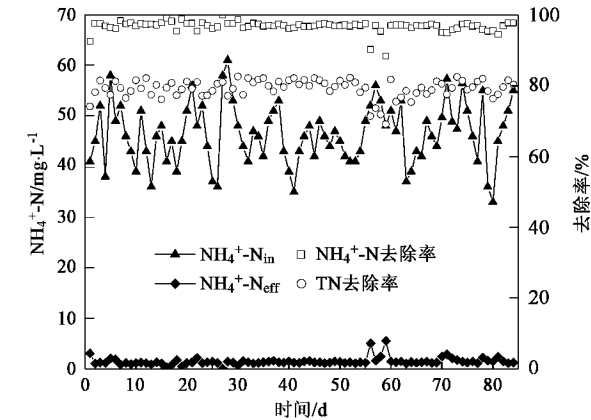


图 3 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN 去除效果
Fig.3 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN removal efficiency

2.2 水解酸化对反硝化效率的影响

为了解水解酸化对系统脱氮效果的影响, 在 2 个有效容积为 1 L 的反应器中分别加入污水原水和水解酸化出水, 进行了反硝化批量试验, 结果如图 4、5 所示. 从图 4 可看出, 原水中的 COD 首先有一个

迅速降解的过程, 在试验开始的 30 min 内呈零级反应, 然后在 40 ~ 180 min 之间有一个十分缓慢的降解过程. 水解酸化出水中的 COD 变化与原水有类似的变化规律, 但是水解酸化出水中的 COD 在 1 h 内去除的比例明显比原水大得多. 这是因为污水中的溶解性小分子有机物很容易被微生物吸收利用, 从而能在短时间内得以降解, 而大分子难溶性的有机物首先要降解为可溶性小分子物质后才能被微生物利用. 由此可见污水经水解酸化处理后可以有效地提高脱氮效率.

结合图 4、5 不难发现 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 与 COD 的降解具有十分相似的变化趋势. 这是因为在其它条件相同时, 可利用碳源的数量是反硝化过程的限制因素, 混合液中必须维持适宜的 $\text{C/N}^{[14,15]}$. 原水、酸化出水 2 个反应器中的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 初始浓度分别为 34.8、35.5 mg/L, 3 h 后的浓度分别为 5.2、1.5 mg/L, 由此说明该工艺中污水、污泥经水解酸化后可分解部分大分子有机物为小分子物质, 能够提高后续生物脱氮效率. 综合比较原水、酸化出水反硝化过程中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 与 COD 的浓度变化曲线, 说明水解酸化技术用于强化城市污水脱氮工艺是切实可行的.

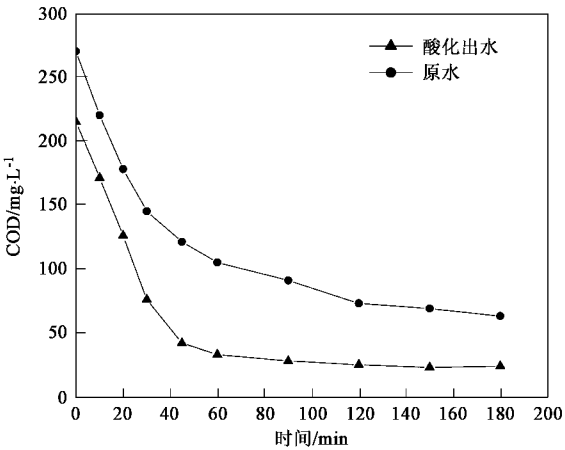


图 4 不同水质反硝化过程中 COD 变化曲线
Fig.4 COD profiles in denitrification under different wastewater

2.3 回流比对脱氮效果影响

在进水流量 6.5 L/h, HRT 为 11 h, 水解酸化 SRT 为 50 d, A/O 段 SRT 为 30 d 条件下, 研究了硝化液回流比对系统脱氮效果的影响, 结果如图 6 所示. 由图 6 可以看出, 随着回流比的增加, TN 平均去除率升高, 回流比从 1 提高到 3, TN 平均去除率从 51.5% 升高至 75% 左右, 且出水 $\text{TN} \leq 15$ mg/L, 但当回流比大于 300% 后, TN 平均去除率逐渐降低. 这是

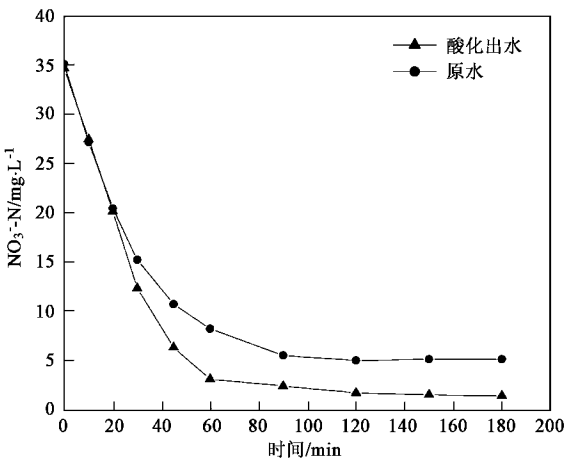


图5 不同水质反硝化过程中 NO_3^- -N 变化曲线

Fig.5 NO_3^- -N profiles in denitrification under different wastewater

由于对前置反硝化生物脱氮而言, TN 的去除主要发生在反硝化阶段, 其平均去除率受回流比的限制, 回流比越高平均去除率也越高, 但反硝化段碳源量和回流硝化液中的溶解氧会影响反硝化效率. 本试验将回流比最终控制在 3 是根据反硝化出水的 COD 来确定的. 当回流比为 3 时, 反硝化出水 COD 为 70 mg/L 左右, 而硝化出水 COD 在 30 ~ 50 mg/L 之间, 且主要是不易生物降解的有机物. 这说明原污水中可利用的有机物很少, 再进一步提高回流比, 则必须外加碳源, 才能进一步提高 TN 平均去除率. 因此, 在无外加碳源条件下, 回流比控制在 3 是适宜的. 如果污水中有机物浓度高的话, 为提高脱氮效果还可以进一步提高回流比.

2.4 污泥减量化

试验将每日产生剩余污泥回流到水解酸化反应

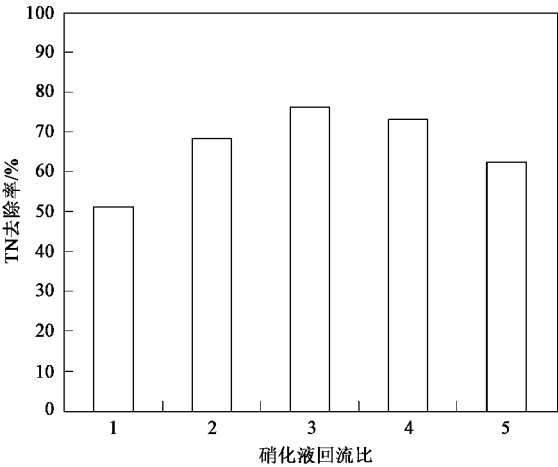


图6 硝化液回流比对脱氮效果影响

Fig.6 Effect of returned nitrification liquor on nitrogen removal

器, 由于在水解酸化反应器内实现了水力停留时间和固体停留时间的分离, 整个系统从水解酸化反应器排泥, 并由此认为主要是在水解酸化反应器中实现对回流剩余污泥的减量. 反应器启动后, 维持系统水解酸化反应器的容积负荷 (以 COD 计) 为 3.52 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, 水力停留时间 3.5 h, 固体停留时间 40 d. 在连续运行的 120 d 中, 除了每次取样带出的 MLSS 外, 系统没有排泥, 获得良好的污泥减量效果.

图 7 为试验期间水解酸化段污泥浓度、MLVSS/MLSS、剩余污泥回流量的变化曲线. 由图 7 可见, 试验期间水解酸化段污泥浓度逐渐增加, 第 8 周时, 污泥浓度从第 1 周的 5.51 g/L 增加到 7.92 g/L , 第 10 周以后系统污泥浓度增幅减缓, 回流到水解酸化段的剩余污泥, 一部分作为该段污泥系统微生物的补充, 一部分被系统水解、减量, 水解酸化段污泥浓度的逐渐增加, 意味着回流到该段的剩余污泥只有部分被水解、减量, 其余的作为该段污泥的补充.

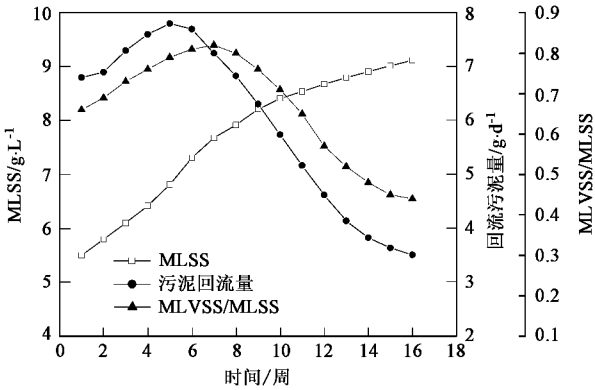


图7 污泥水解酸化效果

Fig.7 Hydrolysis and acidification of activated sludge

MLVSS/MLSS 在试验初期逐渐增加, 第 7 周时达最大值, 从第 1 周的 0.66 增加到 0.82, 然后迅速降低, 第 16 周时降至 0.44, 这是由于试验初期污泥回流量较大, MLVSS 在系统中发生积累, 随着污泥回流量减小和污泥的水解酸化, 回流污泥中的 MLVSS 含量小于水解酸化降解部分, 同时污泥水解酸化过程中系统中难降解组分发生积累. 由图 7 中的剩余污泥回流量变化曲线可见, 剩余污泥回流量在试验开始阶段逐渐增加, 第 5 周时, 由开始时的 6.83 g/d 增加到最大值 7.84 g/d , 而后逐渐减少, 到 16 周时仅为 3.52 g/d . 在试验条件下, 剩余污泥在水解酸化段中实现了减量. 在不计水解酸化段增殖的水解、酸化细菌的情况下, 可以根据式(1)得出该段反应器中的污泥减量率^[16].

$$R_e = \frac{\Delta MLSS_{回流} - \Delta MLSS_{取样} - \Delta MLSS_{水解}}{\Delta MLSS_{回收}} \times 100\%$$

(1)

式中, R_e 为剩余污泥减量率, $\Delta MLSS_{回流}$ 为回流的剩余污泥量, $\Delta MLSS_{取样}$ 为污泥取样量, $\Delta MLSS_{水解}$ 为水解酸化反应器增加的污泥量.

根据式(1), 在 3 个多月的试验时间内, 回流剩余污泥的平均减量率约为 56.2%, 水解酸化段获得良好的污泥减量效果. 如果考虑到增殖的水解、酸化细菌, 则在水解酸化段中污泥减量效果更为明显.

3 结论

(1) 在无外加碳源情况下, 该工艺具有较高的脱氮效率和有机物去除率, 在试验条件下, 当进水 COD 浓度在 220 ~ 410 mg/L, NH_4^+ -N 浓度在 36 ~ 58 mg/L 时, 系统 COD 的平均去除率大于 90%, NH_4^+ -N 平均去除率大于 95%, TN 平均去除率大于 75%.

(2) 试验将水解酸化作为污水、污泥一体化处理工艺取得良好效果, 不仅可以有效提高脱氮效率, 污泥水解酸化后还可以为反硝化段补充一定量碳源, 为城市污水的高效低耗脱氮处理提供一条新的思路.

(3) 由于水解池内固体停留时间远远大于水力停留时间, 系统中厌氧菌除了对污水产生厌氧水解作用外, 同时对污泥产生了厌氧消化作用, 水解酸化段利用水解酸化作用对回流剩余污泥的减量达到 56.2%, 因此, 本工艺可实现剩余污泥减量化、资源化.

(4) 本方法具有节能、高效、出水水质好且稳定等优点, 该工艺流程具有操作管理简单、占地面积小, 投资和运行管理成本低等特点.

参考文献:

[1] 郑兴灿. 城市污水生物除磷脱氮工艺方案的选择研究[J]. 给

水排水, 2000, **26**(5): 104-106.
[2] 刘鸿志. 新时期全国水污染防治工作的分析和建议[J]. 环境保护, 2002, **20**(2): 9-12.
[3] Schmidt I, Bock E. Anaerobic ammonia oxidation with nitrogen dioxide by *Nitrosomonas eutropha*[J]. Arch Microbiol, 1997, **167**: 106-111.
[4] Verstraete W, Philips S. Nitrification-denitrification processes and technologies in new contexts[J]. Environmental Pollution, 1998, **102**: 717-726
[5] 龚云华. 污水生物脱氮除磷技术的现状与发展[J]. 环境保护, 2000, **18**(7): 23-25.
[6] 徐金兰, 彭党聪, 王志盈, 等. 关于废水生物脱氮除磷系统中的碳源问题[J]. 环境工程(增刊), 2002, 283-286.
[7] Yasui H, Shibata M. An innovative approach to reduce excess sludge production in the activated sludge process[J]. Wat Sci Tech, 1994, **30**(9): 11-20.
[8] Djafer M, Luck F, Rose J, *et al.* Transforming sludge into a recyclable and valuable carbon source by wet air oxidation [J]. Wat Sci Tech, 2002, **41**(8): 77-83.
[9] Hatziconstationu G J, Yannakopoulos P, Andreadakis A. Primary sludge hydrolysis for biological nutrient removal [J]. Wat Sci Tech, 1996, **34**(1): 417-423.
[10] Yilmazer G, Yenigun O. Two-phase anaerobic treatment of cheese whey[J]. Wat Sci Tech, 1999, **40**(1): 289-295.
[11] Jiangw Z, Kitamura Y, Li B M. Improving acidogenic performance in anaerobic degradation of solid organic waste using a rotational drum fermentation system[J]. Bioresource Technology, 2005, **96**: 1537-1543.
[12] Min K S, Park K S. Acidogenic fermentation: utilization of waste sludge as a carbon source in the denitrification process [J]. Environmental Technology, 2002, **23**: 293-302.
[13] Moser E R, Udert K M, Wild D, *et al.* Products from primary sludge fermentation and their suitability for nutrient removal [J]. Wat Sci Tech, 1998, **38**(1): 265-273.
[14] 章非娟, 杨殿海, 傅威. 碳源对生物反硝化的影响[J]. 给水排水, 1996, **22**(7): 26-28.
[15] 徐亚同. 生物反硝化除氮研究[J]. 环境科学学报, 1994, **14**(4): 445-453.
[16] 杨波, 陈季华, 奚旦立, 等. 厌氧水解酸化-好氧化 $A_1/A_2/O$ 工艺剩余污泥减量[J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 478-482.