

CAST 工艺处理低 C/N 生活污水 的强化脱氮性能

马娟^{1,2} 彭永臻^{1*} 王淑莹¹ 王丽¹ 王少坡^{1,3}

(1 北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复重点实验室, 北京 100022

2 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 3. 天津城市建设学院环境与市政工程系, 天津 300384)

摘要 研究了不同运行条件对 CAST 工艺处理低 C/N 实际生活污水脱氮性能的影响, 并对 pH 值和 ORP 的变化规律进行了分析。结果表明, 传统 4 h 运行模式下, 提高原水 C/N 比, TN 去除效果并无显著提高; 对于低 C/N 生活污水, 降低充水比有利于提高出水 TN 去除率, 然而, 充水比降至 16% 时, 系统因低负荷运行发生污泥膨胀。在不投加外碳源的情况下, 采用分段进水交替 A/O 运行模式可大幅改善系统脱氮性能, 且 TN 去除率随着交替次数的增多而提高, 交替 4 次平均去除率达 87.23%。系统采用实时控制方式运行时, 可根据有机物降解、氨氧化及反硝化时 pH 值和 ORP 曲线上是否出现拐点, 来判断反应系统的曝气以及搅拌时间是否过长、适当或不足。

关键词 生物脱氮 生活污水 CAST

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2009)02-0234-05

Enhancing nitrogen removal performance of CAST for low ratio of C/N municipal wastewater treatment

Ma Juan^{1,2} Peng Yongzhen¹ Wang Shuying¹ Wang Li¹ Wang Shaopo^{1,3}

(1 Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering Beijing University of Technology,

Beijing 100022 2 Institute of Environmental and Municipal Engineering Lanzhou Jiaotong University Lanzhou 730070;

3. Department of Environmental and Municipal Engineering Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384)

Abstract The nitrogen removal performance of CAST treating low C/N wastewater under different operation conditions was investigated and the profiles of pH and ORP were analyzed. The results showed that TN removal rate couldn't be improved by increasing the C/N ratio of wastewater when the system operated in traditional mode. Decreasing the filling ratio of wastewater was helpful for increasing TN removal rate, while sludge bulking and nitrate accumulation happened because of the operation under long-term condition of low carbon source and incomplete denitrification when the filling ratio was 16%. Nitrogen removal efficiency could be greatly enhanced by alternating anoxic-aerobic process with step feeding without adding external carbon source, and it was increased by increasing feed frequency with the maximum value of 87.23%. When real-time control strategy was employed, the judgment on the ending of nitrification and denitrification could be based on the inflection point on the varied curve of ORP and pH during organic degradation, ammonia oxidation and nitrate reduction, and thus reducing aeration and mixing time for the purpose of energy saving.

Key words biological nitrogen removal; municipal wastewater; cyclic activated sludge technology

污水中磷的去除可以借助于化学或生物方法, 但氮的去除几乎只能用生物学方法^[1]。传统的脱氮处理采用两段法, 即氨氮在好氧条件下被氧化成硝酸盐氮, 而后硝酸盐氮在缺氧条件下被还原为氮气。因此, 一般需要 2 个反应器来进行 2 种不同的工艺过程。CAST 工艺是 SBR 的一种变形, 因具有投资及运行费用低、运行简单灵活及其选择器能防止污泥膨胀和主反应区内可进行同步硝化反硝化等

特点在众多污水处理工艺中脱颖而出, 并且, 近年来

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点项目 (2006BAC19B03); 新加坡环境与水工业发展协会项目 (EDBS07/1-53974082); 北京工业大学第六届研究生科技基金资助项目 (ykj2007-1497); 北京市重点实验室开放研究课题

收稿日期: 2008-06-15 修订日期: 2008-06-30

作者简介: 马娟 (1978~), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向: 水污染控制。E-mail: majuan@emails.bjut.edu.cn

随着计算机及各种软件的发展, CAST 工艺备受设计者青睐,使得诸多污水处理厂纷纷采用^[2-4]。

然而,传统 CAST 工艺运行方式也有其局限性,由于缺少缺氧搅拌阶段,其脱氮性能受到限制,而且,采用固定时间长度的控制方式不能适应进水水量、水质的变化,从而使得工艺对污染物的去除效率不稳定,出水水质得不到保证^[5]。应用 DO、ORP 和 pH 值作为实时控制参数优化污水处理工艺运行条件,提高污水处理厂运行管理,可有效提高污水处理效率,降低系统运行费用,是一种可持续发展方法^[6-10]。因此,结合 CAST 工艺运行灵活的特点,研究一种新的运行方式以提高脱氮效率成了解决这一问题的当务之急并为实际污水处理厂提供理论依据。

本研究主要考察 CAST 工艺采用不同运行方式对低 C/N 比实际生活污水脱氮效果的影响,并对主反应区进行 DO、ORP 和 pH 值的在线监测,根据 pH 值和 ORP 曲线上是否出现拐点,来判断反应系统的曝气以及搅拌时间是否过长、适当或不足。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

试验所用 CAST 装置如图 1 所示。反应器总容积 24 L,有效容积 18 L,有机玻璃制。选择器和主反应区中均设有搅拌器,保持泥水混合均匀。

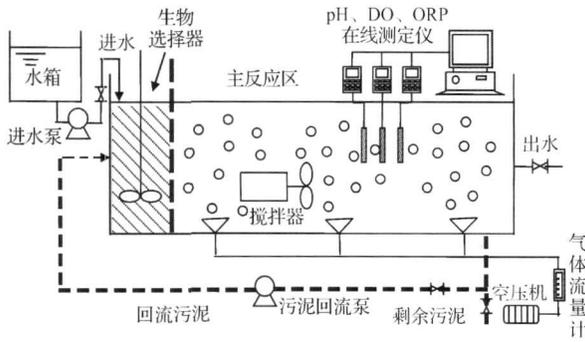


图 1 CAST 工艺试验装置图

Fig 1 Schematic diagram of CAST process

试验分 3 个阶段进行,如图 2 所示。第 1 阶段,传统 4 h 运行模式,考察不同碳氮比和不同充水比(33%、25% 和 16%)下的脱氮性能,混合液回流量为进水量的 20%。第 2 阶段,固定充水比(25%)和回流比(20%),交替 A/O(缺氧好氧)方式运行。第 3 阶段,固定充水比(25%)和回流比(20%),交替 A/O 方式运行并进行实时控制。定时检测混合液的 SV、SVI、MLSS、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 和 COD 等参数,在线监测 DO、ORP 和 pH 值。

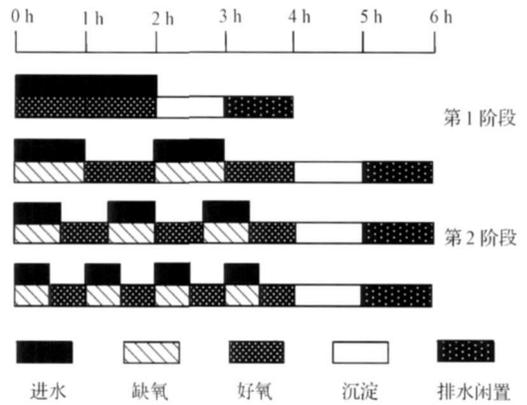


图 2 CAST 的运行方式

Fig 2 Operation mode of CAST process

1.2 试验用水

试验采用 2 种不同碳氮比的原水,第 1 种 C/N 比的原水取自北京工业大学教工家属区化粪池, C/N 比平均值为 2.8。第 2 种 C/N 比的原水采用一半的生活污水加一半的自来水混合,再投加适量无水乙酸钠于水箱中配制而成,配水后 C/N 比平均值为 5.7(此原水仅用于试验第一阶段考察不同进水 C/N 比下的脱氮性能)。试验水温 22~25 °C, pH 值 7.15~7.7, 碱度 200~420 mg/L。

1.3 分析项目及方法

水样分析项目中 NH₄⁺-N 采用纳氏试剂光度法; NO₃⁻-N 采用麝香草酚分光光度法; NO₂⁻-N 采用 N-(1-萘基)乙二胺光度法; COD 采用 5B-3 型快速测定仪; TN 采用 Multi N/C 3400 型 TOC 测定仪; DO、ORP 和 pH 值采用 WTW Multi 340i 多功能在线测定仪; 总碱度、MLSS、VSS 均按国家环保局发布的标准方法测定^[11]。

2 结果与分析

2.1 污泥的培养和驯化

本试验以北京市酒仙桥污水处理厂曝气池回流污泥为种泥,培养驯化 2 个月,前 1 月采用瞬时进水,限制性曝气,当 MLSS 达到 4 000 mg/L 左右时,按试验方案运行。其间,定期监测出水水质,当出水 COD 低于 50 mg/L, NH₄⁺-N 去除率达 95% 以上时结束驯化。试验所得数据均以改变运行条件待系统稳定后开始记录,且各阶段出水氨氮浓度均低于 3 mg/L。

2.2 结果和讨论

2.2.1 不同进水 C/N 比下的污染物去除情况和污泥沉降效果

图 3 为传统 4 h 运行模式下 2 种 C/N 比对污染物去除和污泥沉降性能的影响。由图 3 可见, C/N

比为 2.8 和 5.7 的系统 SVI 平均值分别为 148 和 141 mL/g。当原水碳氮比较高时,出水 TN 较低,原因一方面是由于此种情况下系统进水 TN 浓度本来就低;另一方面,碳氮比较高时,曝气期间系统内有很长一段时间溶解氧低于 1 mg/L,随着原水的不断进入,用于反硝化反应的有机碳源相对比较充足,这为同步硝化反硝化提供了理想环境,因此, TN 去除率也相对较高(约为 72.16%),低碳氮比下的系统 TN 去除率则为 60.73%。但是,这种提高原水 C/N 比的方式会造成能源浪费,因为系统内硝化反应总是发生在异养菌降解有机物之后,因此,碳源不能被充分利用。

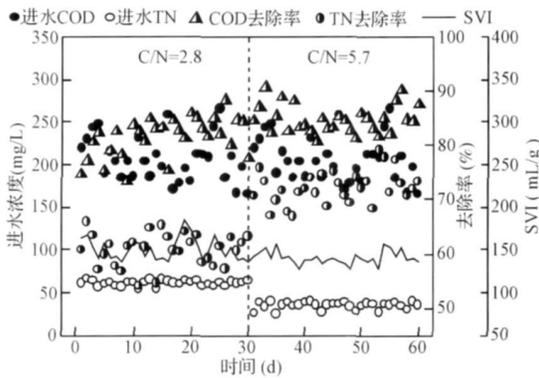


图3 C/N比传统运行模式污染物去除和污泥沉降性能的影响

Fig 3 Effect of C/N ratio on COD, nitrogen removal performance and SVI of traditional mode

2.2.2 不同充水比下的污染物去除情况和污泥沉降效果

由图 4 可见,充水比对 CAST 工艺传统运行方式的脱氮性能和污泥沉降性能有一定影响。降低充水比, TN 去除性能逐步提高,充水比 m 为 33%、25% 和 16% 的 TN 去除率分别为 60.73%、72.51% 和 81.38%。研究还发现,保持污泥龄不变,在 33% 和 25% 2 种充水比条件下,系统 SVI 平均值分别为 148 和 155 mL/g 相差不大, MLSS 均为 3 500 mg/L 左右;当充水比降至 16% 时, SVI 平均值为 241 mL/g 系统运行 11 d 后,出水 SS 升高, MLSS 降至 1 000 mg/L 以下。

分析认为,导致以上情况出现的原因是,降低充水比意味着进入系统的氨氮量减少,因此出水中 TN 相应降低,然而系统长期低负荷(F/M)运行,絮状菌竞争力势必减弱,丝状菌成为优势菌种^[12-15],从而导致试验 SVI 值升高。此外, Casey 等^[16]经过研究提出的低 F/M 条件下脱氮体系污泥膨胀的不完全反硝化控制假说认为,反硝化产物 NO 及 N₂O 将

阻碍好氧条件下细胞色素 O 在菌胶团菌中的形成,从而影响菌胶团菌对营养物质的利用。相反,一些特殊的丝状菌在反硝化阶段只能将硝酸盐转化为亚硝酸盐,因此,在菌体内不存在 NO 和 N₂O 的积累。由于上述原因,在不完全反硝化条件下,不完全反硝化的中间产物不会影响丝状菌的代谢,从而造成竞争中丝状菌的增殖。因此,上述 2 个条件协同作用是造成充水比为 16% 时污泥膨胀的原因。

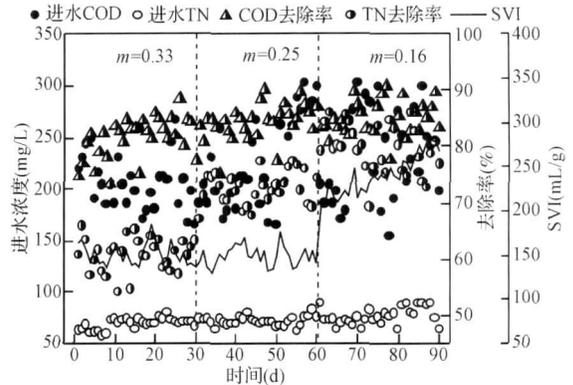


图4 充水比对传统模式污染物去除和污泥沉降性能的影响

Fig 4 Effect of filling ratio on COD, nitrogen removal performance and SVI of traditional mode

2.2.3 分段进水的污染物去除情况和污泥沉降效果

为实现碳源的充分利用并进一步节约曝气量,试验考察了 CAST 分段进水运行方式的脱氮性能。不同交替次数的污染物去除情况和污泥沉降效果如图 5 所示。由图 5 可见,保持进水总量不变,采用等量分段进水方式,进水次数为 2 次、3 次和 4 次的 TN 去除率分别为 81.29%、83.87% 和 87.23%,脱氮效率随着进水次数的增加而提高,相应的 SVI 几乎没有变化。这是由于进水次数越多,碳源越容易被最大程度利用,所以出水 TN 越低,但进水次数的增多并不能明显改善 TN 去除效果,原因是试验用原水相对普通城市污水 C/N 较低,不能保证曝气期间产生的硝态氮完全被反硝化;而进水负荷不变,因此, SVI 值变化不大。

由于各分段次数下的参数特征相似,图 6 仅给出了交替 A/O 4 次主反应区 pH 值、ORP 变化曲线以及与此相对应的 COD 和 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N (简称“三氮”)的变化规律。图 5 中,系统在第 1 个缺氧阶段进入一定量原污水,其中碳源用于反硝化上个周期未残留的硝酸盐, pH 值表现为上升, ORP 则因为系统内氧化态物质质量的减少而降低;好氧期间,前一缺氧段进入系统的氨氮硝化需要碱度,导致 pH 值下降, ORP 则呈现整体上升趋势。图 6 中各

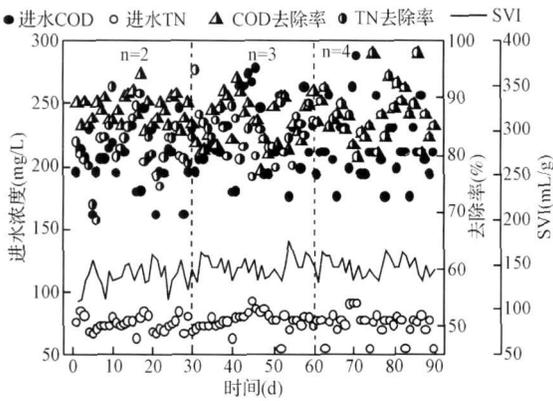


图 5 不同交替次数下的污染物去除情况和污泥沉降效果

Fig. 5 COD, nitrogen removal performance and SVI of alternation times during alternating modes

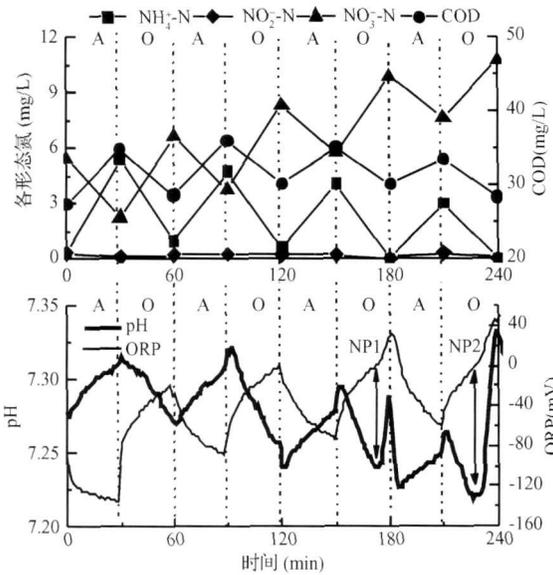


图 6 交替 4 次污染物、pH 值和 ORP 变化曲线

Fig. 6 COD, nitrogen transformation and profiles of pH value, ORP during 4-time alternating mode

好氧阶段 ORP 上升速率先快后慢, 原因分析如下: 一般硝化反应发生在有机物降解结束后, 主要是由于有机物降解未结束, 异氧菌的生长速率高, 和硝化菌竞争溶解氧, 硝化菌得不到充足的氧气, 硝化反应不能进行。当系统中剩余的易降解有机物已不多, 异氧菌无法再大量摄取有机物时, 系统供氧高于耗氧, DO 开始大幅上升, DO 没有成为硝化菌生长的限制因素, 故有机物降解和硝化反应同时发生。ORP 开始缓慢持续上升, 而没有出现平台。主要原因是: ①在硝化过程中, 随着氨氮不断减少, 硝化速率不断降低, 导致耗氧速率小于供氧速率, 造成 ORP 的不断上升现象, ②硝化菌的比增长速率明显小于异氧菌, 故

ORP 的上升速率变缓^[17]。在第 3 个好氧段和第 4 个好氧段进程中, pH 值曲线出现凹点 (NP1 和 NP2), 即文献报道的“氨谷”, 指示了硝化反应的终点。前 2 个好氧段没有出现“氨谷”是因为恒定曝气量和曝气时间不能满足较高浓度氨氮完全硝化的要求。

硝化过程中 pH 值的变化是曝气吹脱 CO₂ 和硝化消耗重碳酸盐碱度综合作用的结果。硝化过程中产生 H⁺, pH 值下降, 硝化结束后, 继续曝气吹脱 CO₂ 导致 pH 值上升^[18]。硝化结束后, 向反应器投加原水作为反硝化碳源, 反应进入反硝化阶段。反硝化过程中产生碱度引起 pH 值上升, 一旦反硝化反应结束, 继续搅拌系统进入厌氧产酸阶段, 从而导致 pH 值和 ORP 下降, pH 和 ORP 曲线上分别出现“硝酸盐峰”和“硝酸盐拐点”^[19]。本研究中, 由于系统内硝态氮没有完全消失, pH 和 ORP 曲线均没有出现上述特征点, 而导致反硝化不完全的主要原因是缺氧阶段缺乏碳源或搅拌时间不足。

2.2.4 交替 A/O 的实时控制系统运行

图 7 为实时控制运行条件下污染物、pH 值和 ORP 随时间的变化曲线。图 7 中 pH 曲线上各好氧阶段均出现了“氨谷”, 即 NP1、NP2 和 NP3 点。在各缺氧段 ORP 值持续下降, 其原因主要是氧化态物质 (NO_x-N) 经反硝化菌转化成 N₂, 造成氧化态物质质量的减少, 随着反硝化的进行, ORP 值的下降速率逐渐减慢, 最后出现平台, 即使延长缺氧时间, ORP 仍然没有变化。原因是, 系统采用等量分段进水方式且 15 min 进水完毕, 因此, 各缺氧段前 15 min 的 pH 和 ORP 变化曲线相应较陡, 之后变缓, 然而, 尽管反硝化作用因碳源不足已经停止, pH 值却没有因为反硝化停止而不变得, 而是一直保持缓慢上升趋势, 这主要是由于反硝化过程产生 CO₂, 继续搅拌则使系统内积累的 CO₂ 不断逸出。分析认为, 在处理低 C/N 原水的情况下, pH 值的特征点可以很好地判断硝化反应的结束, 但不能作为判断完全反硝化的结束点。应结合 pH 值和 ORP 作为反硝化的判断点, 如果在反硝化过程中 pH 值一直上升且 ORP 没有出现“硝酸盐拐点”, 此时需投加足够碳源并延长缺氧时间才能达到完全反硝化。

同时发现, 即使采用了实时控制方案, 由于系统进水碳源不足, 其 TN 去除率相对于固定时间的交替 A/O 运行方式亦无显著提高。加入碳源适当调节原水 C/N 可以达到完全反硝化, 但是体系中添加过量碳源一方面会造成出水水质恶化, 曝气量上升, 从而提高好氧运行成本, 另一方面也会引起高 F/M 污泥膨胀。因此, 该实时控制方案在后续试验研究中仍待进一步修定, 如采取变换进水量及进水时间,

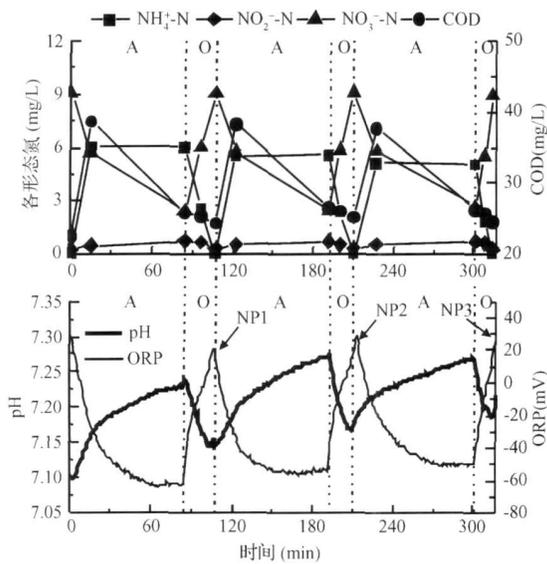


图7 实时模式下污染物、pH值和ORP随时间的变化

Fig. 7 COD, nitrogen transformation and profiles of pH value, ORP during real-time control mode

以及最后投加碳源以使反硝化作用进行彻底等措施。

3 结论

(1)传统4h运行模式下, TN去除率并不因原水碳氮比的增大而显著提高;降低充水比有利于低C/N生活污水总氮的去除,但充水比降至16%时,系统因低负荷运行发生污泥膨胀。

(2)采用分段进水交替A/O运行模式可大幅改善CAST处理低C/N生活污水的脱氮性能,保持处理水量不变,等量分段进水,随着进水次数的增加,脱氮效率逐步提高,交替4次TN平均去除率可达87.23%。但分段次数过多使操作变得复杂,对于普通城市污水,建议采用3次等量进水方式。

(3)系统采用实时分段进水方式运行时,可根据pH值和ORP曲线上是否出现拐点,来判断反应系统的曝气以及搅拌时间是否过长、适当或不足。对于低C/N生活污水,硝化过程可依据pH值曲线上出现的“氨谷”结束,而反硝化由于进水碳源不足未进行彻底,此时不能根据pH值“硝酸盐峰”和ORP“硝酸盐拐点”作为判断反硝化终点的控制参数。因此,实时控制方案需根据进水水质及方式加以优化。

参考文献

[1] 郑兴灿, 李亚新. 污水除磷脱氮技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998

[2] Goronszy M. C. The cyclic activated sludge system for re-

sort area wastewater treatment W at Sci Tech, 1995 32(9/10): 105~114

[3] Goronszy M. C. Co-current nitrification/denitrification and biological P-removal in cyclic activated sludge system plants by redox controlled cycle operation W at Sci Tech, 1997, 35: 215~224

[4] Mervyn C. Goronszy, Gunnar Demoulin, Mark Newland Aerated denitrification in full-scale activated sludge facilities W at Sci Tech, 1997, 35(10): 103~109

[5] Wang Shao-pu, Peng Yong-zhen, Wang Shu-ying et al. Applying real-time control to enhance the performance of nitrogen removal in CAST system. Journal of Environmental Sciences, 2005, 17(5): 736~739

[6] Peng Yong-zhen, Gao Jing-feng, Wang Shu-ying, et al. Use pH and ORP as fuzzy control parameters of denitrification in SBR process W at Sci Tech, 2002, 46(4/5): 131~137

[7] Ingildsen P., Wendeboe H. Improved nutrient removal using in situ continuous on-line sensors with short response time W at Sci Tech, 2003, 48(1): 95~102

[8] 高大文, 彭永臻, 王淑莹, 等. 利用ORP和pH控制豆制品废水的处理过程. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(6): 647~650

[9] 杨岸明, 王淑莹, 杨庆, 等. 以pH和ORP作为脉冲SBR工艺的实时控制参数. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(12): 32~35

[10] 郭建华, 彭永臻, 杨庆, 等. 脉冲SBR处理城市污水深度脱氮的工艺特性. 中国环境科学, 2007, 27(1): 62~66

[11] 国家环境保护局. 水与废水监测分析方法(第3版). 北京: 中国环境科学出版社, 1997

[12] 陈滢, 彭永臻, 刘敏, 等. SBR法处理生活污水时非丝状菌污泥膨胀的发生与控制. 环境科学学报, 2005, 25(1): 105~108

[13] 陈滢, 彭永臻, 刘敏, 等. 营养物质对污泥沉降性能的影响及膨胀污泥的控制. 环境科学, 2004, 5(6): 54~58

[14] Martins A. M. P., Pagila K., Heijnen J. J., et al. Filamentous bulking sludge—a critical review. Water Res, 2004, 38: 793~817

[15] 周利, 彭永臻. 膨胀污泥沉降性能的恢复试验研究. 中国给水排水, 2004, 20(2): 1~4

[16] Casey T. G., Wentzel M. C., Loewenthal R. E., et al. A hypothesis for cause of low F/M filament bulking in nutrient removal activated sludge system. Water Res, 1992, 26(6): 867~869

[17] 高大文, 彭永臻, 郑庆柱. SBR工艺中短程硝化反硝化的过程控制. 中国给水排水, 2002, 18(11): 13~18

[18] 高景峰, 彭永臻, 等. 以DO、ORP及pH控制SBR法的脱氮过程. 中国给水排水, 2001, 17(4): 6~11

[19] Kim Ju Hyun, Chen Meikue, Kishida Naohiro, et al. Integrated real-time control strategy for nitrogen removal in swine wastewater treatment using sequencing batch reactors W at Sci Tech, 2004, 38(14/15): 3340~3348