

pH 值对猪场养殖废水常温短程硝化特性的影响*

闫立龙 张颖 李传举 代英杰 韩雪

(东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

【摘要】 为实现高氨氮猪场养殖废水高效脱氮处理, 针对猪场废水中尿素(主要源于猪尿液)水解过程伴随着污水 pH 值的变化现象, 采用序批式活性污泥法(SBR)处理某猪场养殖废水, 在常温(20℃)、非限制溶解氧的条件下, 考察了 pH 值、曝气时间等因素对氨氮去除效果和短程硝化特性的影响。实验结果表明, pH 值在 7.0 ~ 9.5 范围内亚硝酸盐积累率在 75% ~ 80% 之间; 长时间曝气并未对短程硝化造成影响; 高质量浓度氨氮废水生物处理过程中, 亚硝酸盐积累与进水 pH 值、游离氨(FA)及游离亚硝酸(FNA)有关。

关键词: 猪场废水 pH 值 短程硝化 SBR

中图分类号: X713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)10-0181-05

Effect of pH Value on Characteristics of Shortcut Nitrification for Swine Wastewater Treatment under Normal Temperature

Yan Lilong Zhang Ying Li Chuanju Dai Yingjie Han Xue

(School of Resource and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract

In order to achieve high efficient nitrogen removal from high ammonium-nitrogen swine wastewater, sequencing batch reactor activated sludge process (SBR) was used to treat swine wastewater to the phenomenon which the urea (mainly from pig urine) hydrolysis of swine wastewater was accompanied by changes of pH value. Under conditions of normal temperature (20℃) and non-restricted dissolved oxygen, effects of pH value and aeration time on ammonium removal, characteristics of shortcut nitrification were studied. The results showed that nitrite accumulation rate was 75% ~ 80% when pH value was 7.0 ~ 9.5. Shortcut nitrification would not affected by long-term aeration. In the biological treatment process of high ammonium-nitrogen wastewater concentration, the nitrite accumulation was related to levels of pH value, free ammonia (FA) and free nitrite (FNA) in influent.

Key words Swine wastewater, pH value, Shortcut nitrification, Sequencing batch reactor activated sludge process

引言

氨氮是造成水体富营养化的主要原因之一, 随着水体富营养化的加剧, 废水中的氨氮去除刻不容缓。去除废水中氨氮的方法很多, 其中生物法以其高效、低耗的特点, 备受青睐。生物脱氮需要经历硝化和反硝化 2 个过程。常规硝化过程又分为亚硝化

阶段(氨氮在亚硝化菌作用下转化为亚硝酸盐 NO_2^-)和硝化阶段(亚硝酸盐被硝化菌氧化为硝酸盐 NO_3^-)。根据氨氮最终转化产物的不同, 硝化过程又分为短程硝化和全程硝化。短程硝化过程具有基建费用和运行费用低、污泥产量少、反应速度快等一系列优点。影响亚硝酸盐积累的因素很多^[1], 其中 pH 值是影响亚硝酸盐积累的一个非常重要的因

收稿日期: 2011-01-11 修回日期: 2011-03-15

* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2009BAD2C2B)、黑龙江省重点科技攻关资助项目(GB08C203)、苏州科技学院《环境科学与工程》省重点实验室资助项目(Zd091204)和东北农业大学博士启动基金资助项目

作者简介: 闫立龙, 副教授, 博士后, 主要从事水污染控制理论与技术研究, E-mail: yanll98@163.com

通讯作者: 张颖, 教授, 博士生导师, 主要从事污染物生物修复研究, E-mail: zhangyhrb@neau.edu.cn

素,利用亚硝化菌和硝化菌最适宜的 pH 值范围不同^[2-4],从而实现亚硝酸盐积累。但研究表明,pH 值能否实现亚硝酸盐积累存在分歧,Anthonisen^[5-7]等认为,通过控制 pH 值可以实现亚硝酸盐积累,Tokutomi 等^[8-9]却认为高 pH 值有利于亚硝酸盐积累,Jenicek 等^[10]认为,pH 值无法实现亚硝酸盐积累,即使出现也仅限于 pH 值改变的初始时间段内。本文在前期研究温度、氨氮浓度对猪场养殖废水短程硝化特性影响的基础上^[11],针对猪场废水中尿素(主要源于猪尿液)水解过程伴随着污水 pH 值的变化现象,在常温及较宽 pH 值条件下,采用序列间歇式活性污泥法(SBR)工艺处理某猪场养殖废水,考察进水 pH 值对氨氮去除效果及短程硝化特性的影响,并对发生的短程硝化积累原因进行初步分析,以期为实现猪场养殖废水高效脱氮处理奠定基础。

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行模式

实验装置为 6 个完全相同的、由有机玻璃制成的柱形 SBR 反应器(R1~R6),反应器高 330 mm、内径 120 mm、有效容积 3.0 L、交换容积为 1.5 L,曝气系统由空压机和底部的微孔式曝气头(烧结砂芯)组成,曝气量由气体流量计进行控制,通过一个可编程的时间控制器对空压机进行调控,从而实现间歇式运行,具体过程如下:进水 5 min、曝气 300 min、沉淀 40 min、排水 10 min、闲置 5 min,每天运行 4 个周期。实验水温通过温控仪和加热器进行控制,实验装置如图 1 所示。

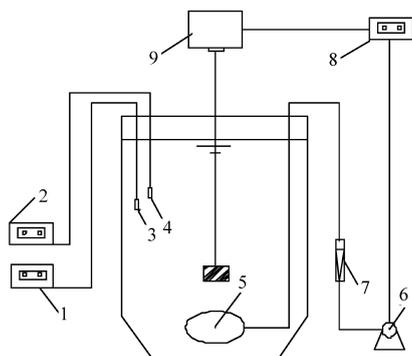


图 1 SBR 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental SBR system

1. pH 值测定仪 2. 温度测定仪 3. pH 值电极 4. 温度传感器
5. 曝气头 6. 空压机 7. 气体流量计 8. 时间控制系统 9. 搅拌机

1.2 实验水质

实验用水为经稀释 2~3 倍的某猪场养殖废水,水质特性为:COD 质量浓度为 684~1 352 mg/L,氨

氮质量浓度为 480~1 020 mg/L,pH 值为 7.80~8.27,亚硝酸氮和硝酸氮质量浓度分别在 1.0 mg/L 和 20 mg/L 以下。

1.3 实验方法

接种污泥为哈尔滨市太平污水处理厂回流污泥,经培养、驯化(氨氮去除率稳定 70% 以上,亚硝酸盐积累率稳定在 60% 以上)后,转入各反应器中,使 SBR 内的污泥质量浓度(MLSS)为 3 000 mg/L,沉降比(SV%)为 20%~35%。

考虑到实验处理污水为猪场废水,其中的氨氮主要源于猪尿液中尿素的水解,在此过程中会伴随着污水 pH 值的变化,实验中,通过向反应器内添加一定量的体积比 1:1 H₂SO₄ 和物质的量浓度为 0.5 mol/L 的 NaOH 溶液,将 R1~R6 反应器的进水 pH 值依次调整为 7.0、7.5、8.0、8.5、9.0、9.5,考察 pH 值对各形态氮转化及短程硝化效果的影响。整个实验过程,反应器内混合液温度控制在 20℃,反应器内溶解氧(DO)控制在 2.0~4.0 mg/L,污泥龄为 20 d。

1.4 分析项目及方法

分析测试方法参照国家标准方法。COD:重铬酸钾法;NH₄⁺-N:纳氏试剂比色法;NO₂⁻-N:N-(1-萘基)-乙二胺光度法;NO₃⁻-N:紫外分光光度法;pH 值:pHS-3C 型精密 pH 计;溶解氧:DO-14P 型 DO 计。

2 实验结果与讨论

2.1 pH 值对氨氮去除效果的影响

pH 值是影响氨氮去除效果非常重要的因素^[8]。pH 值的改变一方面影响微生物的活性,每一种微生物都有其最适宜的 pH 值范围,另一方面 pH 值影响 NH₄⁺-N/NH₃-N 和 NO₂⁻-N/HNO₂-N 的平衡,而 NH₃ 和 HNO₂ 对亚硝化细菌和硝化细菌具有一定的抑制作用,这种抑制作用在高质量浓度氨氮废水处理中显得尤为突出。在其他条件基本稳定的条件下,考察了 pH 值对氨氮去除效果的影响,结果如图 2 所示。

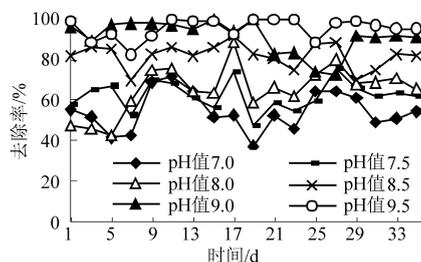


图 2 pH 值对氨氮去除效果的影响

Fig. 2 Effect of pH value on ammonium removal

pH 值对氨氮去除效果影响很大,随着 pH 值增大,氨氮去除效果逐渐增加。在进水平均氨氮质量浓度为 238.85 mg/L 时,R1~R6 各反应器出水平均氨氮质量浓度分别为 100.92、83.57、76.83、40.55、22.80、11.99 mg/L,氨氮去除率分别为 54.44%、62.20%、65.02%、81.62%、90.95%、94.92%。氨氮硝化过程是一个耗碱产酸的过程,实验所处理废水含氨氮质量浓度较高,其在硝化过程中消耗大量碱度,在反应器体积一定时,1.0 g 氨氮转变成亚硝酸氮,需消耗 7.14 g 碱度(以 CaCO_3 计),氨氮质量浓度降低必然引起 pH 值降低。随着反应时间的延长,当反应器内 pH 值较高时,氨氮降低尚不能引起 pH 值降低到抑制硝化反应的进行,氨氮去除效果较好;但当反应器内 pH 值较低时,会引起碱度不足,影响硝化反应的进行,为此将进水 pH 值控制在 9.0~9.5 较好。

2.2 pH 值对亚硝酸盐积累效果的影响

pH 值对亚硝酸盐积累效果的影响如图 3 所示。

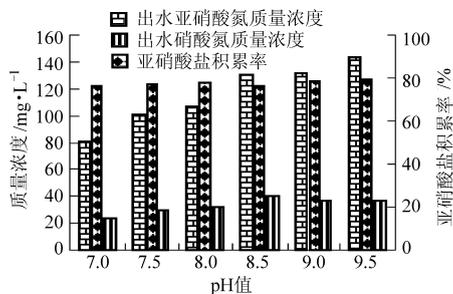


图 3 pH 值对亚硝酸盐积累效果的影响

Fig. 3 Effect of pH value on nitrite accumulation

从图 3 可看出,随着 pH 值的增加,出水亚硝酸氮质量浓度逐渐升高,硝酸氮质量浓度先增加(pH 值 7.0~8.5)后略有降低(pH 值 8.5~9.5),其中出水亚硝酸氮质量浓度在 80.04~143.08 mg/L 之间,出水硝酸氮质量浓度在 24.31~36.92 mg/L 之间;同时还可看出,随着 pH 值升高,亚硝酸盐积累率略有增加,但 pH 值对亚硝酸盐积累率没有大的影响,各反应器的亚硝酸盐积累率在 75%~80% 之间,相差不到 5%。高质量浓度氨氮废水生物处理过程中出现的亚硝酸盐积累是一个涉及游离氨(FA)、游离亚硝酸(FNA)及 pH 值的复杂过程,亚硝酸盐积累主要取决于 FA 和 FNA 的质量浓度,而进水 pH 值的变化仅影响反应初期的 FA 质量浓度,随着反应的进行,氨氮质量浓度逐渐升高,FA 质量浓度降低,而 FNA 质量浓度则有所增加,在本实验条件下,FA 和 FNA 共同抑制的可能作用变化不大,因而 pH 值变化并未引起亚硝酸盐积累率发生大的改变,关于此部分的具体原因还有待于进一步研究。

SBR 工艺处理高氨氮猪场废水时能在较宽的进水 pH 值范围内实现亚硝酸盐积累,这与文献报道结果似乎不一致。Tokutomi 等^[8]认为 pH 值大于 8.0 是实现亚硝酸盐积累的关键参数;Villaverde 等^[9]则认为亚硝酸盐积累时系统的 pH 值需在 7.5 以上。高大文等^[12-13]的研究结果表明,较高 pH 值(7.8~8.7)导致了反应器内亚硝酸氮的积累(这里需要说明的是实验所研究的 pH 值是进水值,并不是文献所述反应器内的 pH 值)。

为了分析亚硝酸积累的原因,对各反应器内的 pH 值进行了跟踪分析,实验结果如图 4 所示,各反应器进水初始 pH 值不同,但随着反应时间的进行,在 45 min 时,各反应器内的 pH 值分别为 7.67、7.84、7.91、7.95、8.73、9.32,均在 7.5 以上,高 pH 值反应器内容易导致亚硝酸氮的积累,这一结论与文献报道结果一致^[9]。实验所处理的污水为猪场废水(猪尿液和猪舍冲刷水混合液),其中的氨氮主要来自尿液中的尿素水解,尽管初始 pH 值有所不同,但尿素的水解能够引起反应器内 pH 值的升高^[14]。然而反应 180 min 时,只有 R5 和 R6 两个反应器内的 pH 值在 7.0 以上,其余均在 7.0 以下,此时反应器内的 pH 值已不在亚硝化菌适宜范围^[15],而变成硝化菌的适宜范围,此时延长曝气时间可能导致亚硝酸盐积累现象消失^[12]。

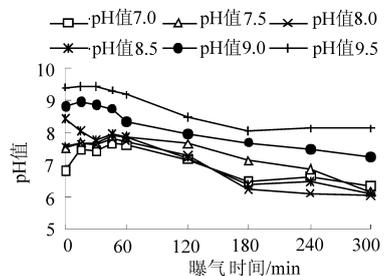


图 4 各反应器内 pH 值随曝气时间的变化

Fig. 4 Change of pH value in different reactors

2.3 曝气时间对亚硝酸盐积累效果的影响

在进水 COD 质量浓度 446.63 mg/L、氨氮质量浓度 244.35 mg/L、温度 20℃、DO 大于 2.0 mg/L 条件下,对稳定运行近 2 个月的反应器内不同曝气时间后各形态氮的变化进行了分析,实验结果如图 5 所示。

从图 5 可看出,随着曝气时间的延长,R1~R4 反应器内的氨氮质量浓度先逐渐降低(0~180 min)后趋于平稳(180~300 min),R5 和 R6 反应器内的氨氮质量浓度则呈逐渐降低趋势,至反应结束,各反应器出水亚硝酸氮质量浓度介于 150~200 mg/L 之间,而对应的硝酸氮质量浓度介于 26~51 mg/L,各反应器内均实现亚硝酸盐积累,延长曝气时间,短程

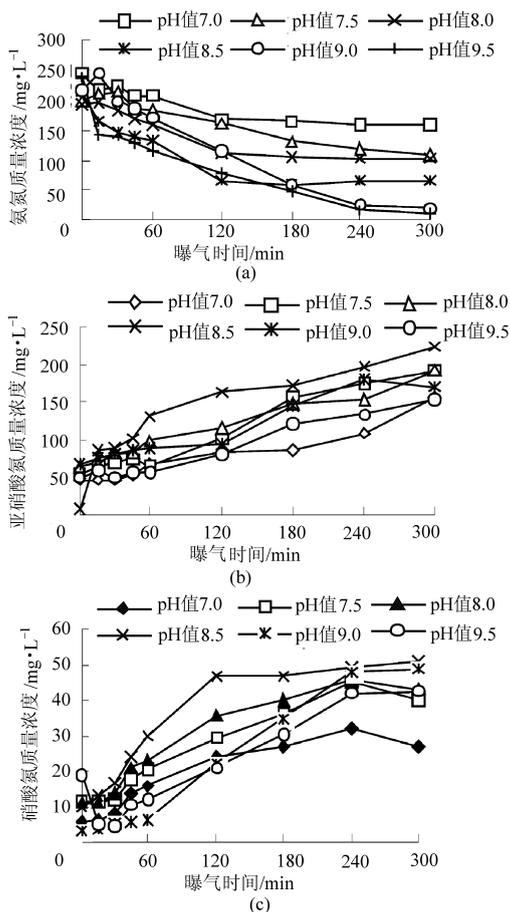


图5 氨氮、亚硝酸氮及硝酸氮质量浓度随时间的变化
Fig. 5 Change of the concentration of ammonium, nitrous, nitrate change with time

(a) 氨氮 (b) 亚硝酸氮 (c) 硝酸氮

硝化现象并没有消失。硝化反应是一个耗碱产酸的过程,实验进水氨氮质量浓度较高,随着氨氮逐渐转化,将消耗大量的碱度,此时反应器内 pH 值会逐渐下降,pH 值降低会导致反应器内碱度不足并影响亚硝化菌和硝化菌的生物活性,进而抑制硝化反应的继续进行,因此,尽管延长反应时间(180 min),R1~R4 反应器内的氨氮并没有进一步去除,比较而言,R5 和 R6 反应器内的碱度较高,氨氮降低所耗碱度并未抑制硝化反应的进行;亚硝酸氮质量浓度逐渐升高,硝酸氮质量浓度表现为先逐渐升高后趋于稳定的趋势,氨氮质量浓度变化不大,而亚硝酸盐质量浓度逐渐升高是因为实验所处理的猪场养殖废水中有机氮(主要为尿素)氨化过程产生的氨氮补偿了转化为亚硝酸氮和硝酸盐氮消耗的氨氮质量浓度所致,这与前期的研究结果一致^[14]。

2.4 短程硝化原因初步分析

一般均利用两类细菌对条件的敏感性不同来达到亚硝酸盐积累的目的。在本实验中,所采用的较高质量浓度溶解氧(大于 2.0 mg/L)、较低质量浓度亚硝酸氮(小于 4 mg/L)和常温(20℃)、较长污泥龄

(20 d)等条件,均不利于亚硝酸盐积累,因此较适宜的 pH 值及高 FA 和 FNA 可能是出现亚硝酸盐积累的主要原因。然而,实验在不同进水 pH 值及较长曝气时间条件下,各反应器内均出现了亚硝酸盐积累现象,高 FA 和 FNA 可能是亚硝酸盐积累的原因。Anthonisen^[5]的研究结果表明,FA 对亚硝化菌的抑制质量浓度为 10~150 mg/L,而对硝化菌的抑制质量浓度为 0.1~1.0 mg/L,FNA 对硝化细菌的抑制质量浓度为 0.22~2.8 mg/L。当 FNA 质量浓度大于 0.02 mg/L 时就会对硝化菌产生抑制作用^[16]。

为考察亚硝酸盐积累的原因,在进水氨氮质量浓度为 244.35 mg/L、温度为 20℃、溶解氧质量浓度大于 2.0 mg/L 条件下,各反应器内的 FA 和 FNA 质量浓度 m_{FA} 和 m_{FNA} ^[5] 为

$$m_{FA} = \frac{17}{14} \times \frac{10^p m_{[NH_4^+ - N]}}{e^{6.334/(273+t)} + 10^p} \quad (1)$$

$$m_{FNA} = \frac{46}{14} \times \frac{m_{[NO_2^- - N]}}{10^p e^{-2.300/(273+t)}} \quad (2)$$

式中 t ——绝对温度,K p ——pH 值
 m ——质量浓度,mg/L

图 6 为 FA 和 FNA 质量浓度随时间的变化。从图 6 可看出,在整个周期内,R1、R5、R6 反应器内的 FA 质量浓度均在 0.1 mg/L 以上,而 R2 反应器内的 FA 质量浓度在前 240 min 内均在 0.4 mg/L 以上,R3、R4 反应器内的 FA 质量浓度在前 120 min 内,均在 0.5 mg/L 以上。

从各反应器内 FNA 质量浓度随时间的变化可看出,R1~R4 反应器内的 FNA 质量浓度在 120 min

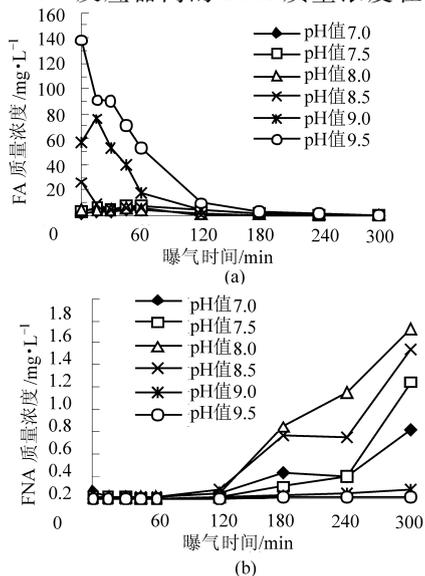


图6 FA 和 FNA 质量浓度随时间的变化

Fig. 6 Change of FA and FAN concentration with time

(a) FA (b) FNA

和 180 min 之后分别在 0.02、0.10 mg/L 以上, R5 反应器内的 FNA 质量浓度在 180 min 之后均在 0.02 mg/L 以上, 而 R6 反应器内的 FNA 在整个周期内均不高于 0.01 mg/L。

由上述计算结果可知, R1 ~ R5 反应器内亚硝酸盐积累是 FA 和 FNA 共同作用的结果, 区别在于 FA 和 FNA 作用的时间不同, 而 R6 反应器内亚硝酸盐积累是 FA 的抑制作用所致, 可见, pH 值引起高质量浓度氨氮废水亚硝酸盐积累的原因是一个复杂的过程, 这其中涉及到 FA、FNA 和 pH 值 3 个比较重要的参数。FA 和 FNA 是不同进水 pH 值反应器内实现亚硝酸盐积累的原因。在相同进水氨氮质量浓度条件下, 对于进水 pH 值较低的反应器, 其反应器内的 FA 和 FNA 是引起亚硝酸盐积累的原因; 而对于进水 pH 值较高的反应器, FA 则是引起亚硝酸

盐积累的原因。

3 结论

(1) 采用 SBR 工艺可以处理高浓度氨氮猪场养殖废水, 进水 pH 值对氨氮去除效果影响较大, 在 pH 值 9.0 ~ 9.5 时, 氨氮去除率稳定在 90% 以上。

(2) SBR 工艺处理猪场废水能够在常温及较宽进水 pH 值范围内 (7.0 ~ 9.5) 发生短程硝化, 随进水 pH 值增加, 亚硝酸盐积累率略有增加, 延长曝气时间对短程硝化过程影响不大, 各反应器的亚硝酸盐积累率在 75% ~ 80% 之间。

(3) 进水 pH 值引起高质量浓度氨氮废水亚硝酸盐积累的原因是一个涉及到 FA、FNA 和 pH 值的复杂过程, 进水 pH 值不同, 反应器内亚硝酸盐积累的原因不同。

参 考 文 献

- 袁林江, 彭党聪, 王志盈. 短程硝化-反硝化生物脱氮[J]. 中国给水排水, 2000, 16(2): 29 ~ 31.
Yuan Linjiang, Peng Dangcong, Wang Zhiying. Nitrogen removal by nitrification-denitrification [J]. China Water & Wastewater, 2000, 16(2): 29 ~ 31. (in Chinese)
- Ralf Stüven, Michael Vollmer, Eberhard Bock. The impact of organic matter on nitric oxide formation by nitrosomonas europaea[J]. Archives of Microbiology, 1992, 158: 439 ~ 443.
- van Benthum W A J, Derissen B P, van Loosdrecht M C M. Nitrogen removal using nitrifying biofilm grow than denitrifying suspended growth in a biofilm air lift suspension reactor coupled with a chemostat[J]. Water Research, 1998, 32(7): 2 009 ~ 2 018.
- 陈旭良, 郑平, 金仁村, 等. pH 和碱度对生物硝化影响的探讨[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2005, 31(6): 755 ~ 759.
Chen Xuliang, Zheng Ping, Jin Rencun, et al. Effect of pH on nitrification [J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci., 2005, 31(6): 755 ~ 759. (in Chinese)
- Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B S, et al. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. J. Water Pollut Control Federation, 1976, 48(5): 835 ~ 852.
- 邓斌, 李小明, 杨麒, 等. pH 控制生物膜移动床反应器完全亚硝化的研究[J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1 720 ~ 1 724.
Deng Pin, Li Xiaoming, Yang Qi, et al. Complete nitritation process in an biofilm moving bed system by controlling pH [J]. Environmental Science, 2007, 28(8): 1 720 ~ 1 724. (in Chinese)
- 方士, 李筱焕. pH 值对高氨氮废水亚硝化/反亚硝化速率的影响[J]. 高校化学工程学报, 2001, 15(4): 346 ~ 350.
Fang Shi, Li Xiaohuan. The effect of pH on partial nitrification-denitrification rate of high ammonia-containing wastewater [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2001, 15(4): 346 ~ 350. (in Chinese)
- Tokutomi T. Operation of a nitrite-type airlift reactor at low DO concentration[J]. Water Science & Technology, 2004, 49(5 ~ 6): 81 ~ 88.
- Villaverde S, Garciaencina P A, Fdz-Polanco F. Influence of pH over nitrifying biofilms activity in submerged biofilters [J]. Water Research, 1997, 31(5): 1 180 ~ 1 186.
- Jenicek P, Svehla P, Zabranska J, et al. Factors affecting nitrogen removal by nitritation/denitrification [J]. Water Science & Technology, 2004, 9(5 ~ 6): 73 ~ 79.
- 闫立龙, 张颖, 李晶, 等. 猪场废水常温短程硝化特性研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 262 ~ 266.
Yan Lilong, Zhang Ying, Li Jing, et al. Shortcut nitrification characteristics for swine wastewater treatment at normal temperature [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 262 ~ 266. (in Chinese)

- 9 张华秀,李晓宁,范伟,等. 近红外光谱结合 CARS 变量筛选方法用于液态奶中蛋白质与脂肪含量的测定[J]. 分析测试学报,2010,29(5):430~434.
Zhang Huaxiu, Li Xiaoning, Fan Wei, et al. Determination of protein and fat in liquid milk by NIR combined with CARS variables screening method[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2010, 29(5): 430~434. (in Chinese)
- 10 吴静珠,王一鸣,张小超,等. 基于近红外光谱的奶粉品质检测技术研究[J]. 光谱学与光谱分析,2007,27(9):1735~1738.
Wu Jingzhu, Wang Yiming, Zhang Xiaochao, et al. Study on quality detection of milk powder based on near infrared spectroscopy (NIR)[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(9): 1735~1738. (in Chinese)
- 11 祝诗平,王一鸣,张小超,等. 近红外光谱建模异常样品剔除准则与方法[J]. 农业机械学报,2004,35(4):115~119.
Zhu Shiping, Wang Yiming, Zhang Xiaochao, et al. Outlier sample eliminating criterions and methods for building calibration model of near infrared spectroscopy analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(4): 115~119. (in Chinese)
- 12 吴静珠,王一鸣,张小超,等. 近红外光谱分析中定标集样品挑选方法研究[J]. 农业机械学报,2006,37(4):80~82.
Wu Jingzhu, Wang Yiming, Zhang Xiaochao, et al. Study on algorithms of selection of representative samples for calibration in near infrared spectroscopy analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(4): 80~82. (in Chinese)
- 13 Jerry Workman, Jr Lois Weyer. 近红外光谱解析实用指南[M]. 褚小立,许育鹏,田高友,译. 北京:化学工业出版社,2009.
- 14 于修焯,杜双奎,岳田利,等. 食用油反式脂肪酸傅里叶红外光谱重组检测技术[J]. 农业机械学报,2009,40(1):114~119.
Yu Xiuzhu, Du Shuangkui, Yue Tianli, et al. FTIR measuring technique of trans fatty acids in edible oil using spectral reconstitution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 114~119. (in Chinese)

(上接第 185 页)

- 12 高大文,彭永臻,王淑莹. 控制 pH 实现短程硝化反硝化生物脱氮技术[J]. 哈尔滨工业大学学报,2005,37(7):1664~1666.
Gao Dawen, Peng Yongzhen, Wang Shuying. Nitrogen removal from wastewater via shortcut nitrification-denitrification achieved by controlling pH [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(7): 1664~1666. (in Chinese)
- 13 Suthersan S, Ganczarcezyk J. Inhibition of nitrite oxidation during nitrification: some observations [J]. Water Pollut. Res. J. Can., 1986, 21(2): 257~262.
- 14 李伟光,闫立龙,李娟,等. SBR 工艺处理高质量浓度尿素废水中短程硝化的特性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(2):61~65.
Li Weiguang, Yan Lilong, Li Juan, et al. Short-cut nitrification characteristics in treating wastewater with high-concentration urea with SBR [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(2): 61~65. (in Chinese)
- 15 孙振世,柯强,陈英旭. SBR 生物脱氮机理及其影响因素[J]. 中国沼气,2001,19(2):16~19.
Sun Zhenshi, Ke Qiang, Chen Yingxu. Mechanism of biodenitrification of SBR and its effecting factors [J]. China Biogas, 2001, 19(2): 16~19. (in Chinese)
- 16 Vadivelu V M, Yuan Z, Fux C, et al. Stoichiometric and kinetic characterization of nitrobacter in mixed culture by decoupling the growth and energy generation processes [J]. Biotechnol Bioeng, 2006, 94(6): 1176~1188.