

城市合流污水 A²/O 处理系统中 TTC-ETS 活性监测研究

高岩¹, 戴兴春¹, 陈曦¹, 黄民生^{1*}, 朱勇¹, 黄燕¹, 王国华²

(1. 华东师范大学资源与环境学院, 上海 200062; 2. 上海市市政工程设计研究总院, 上海 200092)

摘要 研究了温度和 F/M 的变化对 A²/O 系统 TTC-ETS 活性的影响, 分析了 TTC-ETS 活性与 COD 降解的相关关系。通过低 C/N 冲击下 TTC-ETS 活性和理化指标的比较, 讨论了以 TTC-ETS 活性表征系统运行状况的优劣。结果表明, 一定范围内, 温度与 F/M 均与 TTC-ETS 活性成正相关, TTC-ETS 活性(TF/TSS·t)变化范围约 13.2~48.3 mg/(g·h), 最大值约为 60 mg/(g·h); TTC-ETS 活性与 COD 去除率相关性显著, 并且 TTC-ETS 活性可预警系统的异常状态, 当 TTC-ETS 活性为 41.0 mg/(g·h) 时, COD 去除效率最高。

关键词 : A²/O 系统; TTC-ETS 活性; 温度; F/M; 冲击与修复

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)06-

TTC-ETS Activity Monitoring of A²/O Process for Combined Sewage Treatment

GAO Yan¹, DAI Xing-chun¹, CHEN Xi¹, HUANG Min-sheng¹, ZHU Yong¹, HUANG Yan¹, WANG Guo-hua²

(1. School of Resource and Environment, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute, Shanghai 200092, China)

Abstract :The influences of variations of temperature and F/M on the TTC-ETS activity have been experimentally studied. The correlation between TTC-ETS activity and COD degradation was also analyzed. Comparing TTC-ETS activities with physical and chemical indexes when high C/N ratio impacted A²/O process, the advantages and disadvantages of using TTC-ETS activity to characterize the status of A²/O process were illustrated. The results showed that both temperature and F/M were positively correlated with TTC-ETS activity. TTC-ETS activity was in the range of 13.2-48.3 mg/(g·h) and the maximum value was 60 mg/(g·h) which had a significant relationship with COD removal rate. In this system, abnormal state was pre-warned by TTC-ETS activity. The highest removal rate of COD appeared when TTC-ETS activity was 41.0 mg/(g·h).

Key words : A²/O process; TTC-ETS activity; temperature; F/M; impact and repair

城市合流污水 A²/O 工艺运行中常用的活性污泥理化监测指标为混合液悬浮固体浓度(mixed liquid suspended solid, MLSS)、挥发性悬浮固体浓度(mixed liquid volatile suspended solid, MLVSS)、污泥容积指数(sludge volume index, SVI)及污泥龄(SRT)等。以上 4 种指标偏重于活性污泥重量与沉淀性能的监测, 不能表征微生物细胞的活性以及区分死细胞及非生物性固体之间的差别, 因此在生产实践中不能充分满足准确、灵敏的监控要求^[1-3]。

脱氢酶是微生物体内降解有机污染物、获得能量的必需酶^[4]。脱氢酶活性(DHA)指单位时间内活化氢的能力, 从一定程度上反映了生物体的活性状态, 能够准确、灵敏地表征生物体对基质降解能力的强弱^[5]。研究表明, 活性污泥 DHA 可以通过测定污泥电子传递体系(electron transport system, ETS)的活性间接定量, 其中 TTC(2,3,5-氯化三苯基四氮唑)是 ETS 测定中常用的人工电子受体^[6,7]。尹军等^[8]认为通过 TTC-ETS 活性与 COD 浓度监测及其关联

性的分析, 可以科学地诊断和评价曝气池中活性污泥的即时活性状态, 指导废水处理系统的运行和调控。谭学军等^[9]认为 SBR 工艺中 TTC-ETS 活性与 DO、ORP 及 pH 值之间存在着良好的相关关系。唐宁等^[10]则指出 DHA 与污泥中活性细菌数量的对数值呈线性相关, 可以应用 DHA 测定取代传统的细菌平板计数法表征污泥活性。孟雪征等^[11]发现: 活性污泥表现出的 TTC-脱氢酶活性变化与系统对硝酸盐和 COD 的去除规律是一致的, 脱氢酶活性越高, 硝酸盐和 COD 的去除效果越好。

基于上述分析, 采用 TTC-ETS 活性表征城市合流污水 A²/O 工艺中活性污泥降解性状, 反映系统降解能力具有理论可行性。本研究在小试 A²/O 系统中考察了温度和有机负荷(F/M)对活性污泥 TTC-ETS

收稿日期: 2008-07-14; 修订日期: 2008-10-05

基金项目: 上海市建设与交通委员会重大科技攻关项目(重科 2007-07)

作者简介: 高岩(1984-)女, 硕士研究生, 主要研究方向为废水生物处理工艺技术, E-mail: gaoyan1014@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: mshuang@des.ecnu.edu.cn

活性的影响,分析了 TTC-ETS 活性与系统 COD 去除率的相关关系,比较了低 C/N 冲击下 TTC-ETS 活性和常规监测指标监测系统运行的优劣,旨在通过 TTC-ETS 活性的监测,准确、及时地诊断和评价 A²/O 系统活性污泥的降解能力,预警系统运行的异常状态,以期为系统的高效运行和调控提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 实验装置

小试 A²/O 工艺流程如图 1 所示。曝气池尺寸: $L \times B \times H = 60 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$, $V = 14.4 \text{ L}$; 厌氧池和兼氧池尺寸: $R = 16 \text{ cm}$, $H = 28 \text{ cm}$, $V = 4.8 \text{ L}$; 沉淀池尺寸: $R = 18 \text{ cm}$, $H = 32 \text{ cm}$, $V = 5.8 \text{ L}$ 。启动运行时,污水停留时间分别为:曝气池 6 h,厌氧池 2 h,兼氧池 2 h; F/M(系统平均值, $\text{BOD}_5/\text{MLSS} \cdot t$) 约为 $0.12 \text{ g}(\text{g} \cdot \text{d})$,内回流比(R)为 2,污泥回流比(r)为 $1/2$,曝气池 DO 约 $2 \sim 4 \text{ mg/L}$,污泥龄约为 15 d,沉淀池停留时间约为 2.5 h。

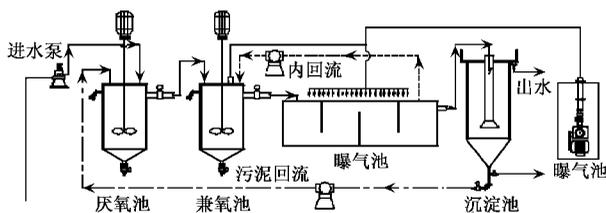


图 1 小试装置流程示意

Fig.1 Operation program of the pilot scale

1.2 进水水质

整个实验过程中均采用上海白龙港城市合流污水处理厂的初沉池进水为小试 A²/O 系统的原水,经沉淀后其进水主要水质指标见表 1。

表 1 进水水质/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 1 Influent water quality/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

水质参数	COD	BOD ₅	NH ₄ ⁺ -N	TP
浓度范围	150~250	90~120	15~30	0.2~1.4
均值	198.5	100.6	18.7	0.5

1.3 实验方法

(1) 温度和 F/M 对 TTC-ETS 活性的影响 利用实验期间的自然气温差,历时 4 个月,考察了 A²/O 系统水温在 $12 \sim 34^\circ\text{C}$ 之间变化时,系统 TTC-ETS 活性的变化规律,每隔 5 d 采样 1 次测定污泥 TTC-ETS 活性($\text{TF}/\text{TSS} \cdot t$)。渐进调节系统进水流量,考察系统负荷($\text{BOD}_5/\text{MLSS} \cdot t$)在 $0.03 \sim 0.44 \text{ g}(\text{g} \cdot \text{d})$ 之间变化时,系统 TTC-ETS 活性的变化规律,每隔 5 d 采样

1 次测定污泥 TTC-ETS 活性。

(2) TTC-ETS 活性监测 A²/O 系统异常问题的研究 在进水中投加 NH₄Cl 降低系统 C/N 比,控制系统 C/N 变化范围为 $8.88 \sim 1.23$,逐步形成对系统的冲击,不同的 C/N 冲击均运行 24 h,隔天取样,考察不同 C/N 对 A²/O 系统冲击时污泥 TTC-ETS 活性的变化。

1.4 分析方法

(1) 标准曲线的制备 TTC-ETS 标准曲线的制备步骤同文献 [12]。

(2) A²/O 系统中 TTC-ETS 活性的测定 15 mL 离心管中加入污泥混合液 5 mL, Tris-HCl 缓冲液 5 mL, 0.36% 的 Na₂SO₃ 溶液 1.5 mL 和 0.4% 的 TTC 溶液 1.5 mL, 混匀。同时作对照,加 2 mL 甲醛溶液抑制酶反应^[13]。将样品与对照于 $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ 恒温水浴振荡器振荡 30 min 后加 2 mL 甲醛溶液,终止酶反应。以上均为暗反应。在 4 000 r/min 离心 15 min 后,弃上清,分别加入 5 mL 三氯甲烷^[14]混匀,继续在 $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ 条件下暗处水浴振荡萃取 10 min 后在 4 000 r/min 下离心 10 min。取有机层,用分光光度计在波长 485 nm 处读取吸光值。离心后的沉淀污泥在 $(105 \pm 1)^\circ\text{C}$ 下烘干 1 h 后测其干质量。TTC-脱氢酶的计算公式如式 (1)^[15]:

$$U^T = \frac{D_{485} V}{k_T W t} \quad (1)$$

式中, U^T 为 TTC-ETS 活性 [$\text{mg}(\text{g} \cdot \text{h})$]; D_{485} 为波长 485 nm 处的有机层液体吸光值; V 为萃取剂体积 (mL); K_T 为标准曲线斜率; W 为污泥干重 (g); t 为振荡时间 (h)。

(3) 其他水质分析方法 MLSS、BOD₅、COD 等常规理化指标的测定参照文献 [16]。

2 结果与讨论

2.1 温度和 F/M 对 TTC-ETS 活性的影响

由图 2 可见, A²/O 系统水温介于 $12.5 \sim 30.0^\circ\text{C}$ 之间变化时,活性污泥 TTC-ETS 活性介于 $13.2 \sim 45.8 \text{ mg}(\text{g} \cdot \text{h})$ (以曝气池平均值为例),并与温度成正相关,温度 $> 30^\circ\text{C}$ 后, TTC-ETS 活性基本可达到最大值,平均为 $52.2 \text{ mg}(\text{g} \cdot \text{h})$,表明在适宜的温度范围内,温度升高可以提高 TTC-ETS 的活性和酶促反应速率。实验结果与严媛媛等^[17]结论类似,表明微生物降解有机污染物的酶促反应同化学反应类似,一定温度范围内反应速率与温度直接相关,低温条件对酶促反应有一定的抑制作用,降低了微生物的

代谢活性,温度升高时酶促反应速率增加,微生物生理活动旺盛,酶活性增强。

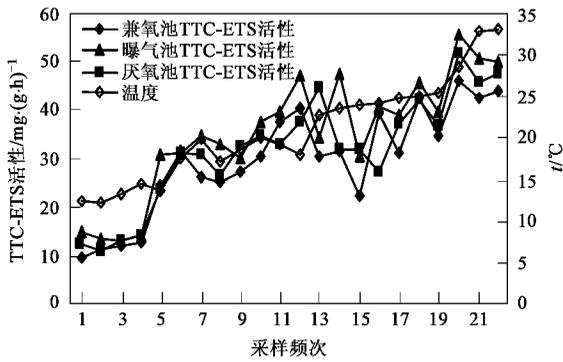


图2 温度对各反应池 TTC-ETS 活性的影响

Fig.2 Effect of temperature on TTC-ETS activity in A²/O process

由图3可以看出, F/M BOD₅ 由 0.07 g(g·d) 上升至 0.35 g(g·d) 时, 活性污泥 TTC-ETS 活性则由 16.2 mg(g·h) 上升至 48.3 mg(g·h), 表明 A²/O 系统内 TTC-ETS 活性与 F/M 成正相关; 当 F/M BOD₅ 介于 0.35 ~ 0.41 g(g·d) 时, TTC-ETS 活性达到最高值约 60 mg(g·h), 并保持相对稳定。实验结果表明, A²/O 系统在一定 F/M 范围内, 微生物生长和酶促反应速度随 F/M 的增加而升高(一级反应), TTC-ETS 活性与 F/M 成正相关, 但 F/M 增加到一定值后, 微生物生长和酶促反应速度不再升高(零级反应)^[18]。

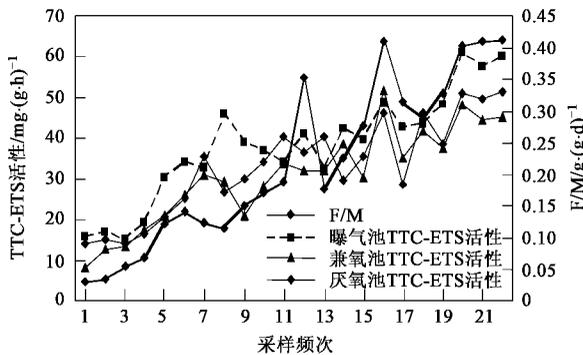


图3 F/M 对各反应池中 TTC-ETS 活性的影响

Fig.3 Effect of F/M on TTC-ETS activity in A²/O process

2.2 TTC-ETS 活性与有机物降解的关系

在 F/M 研究阶段, 系统 COD 去除率与 TTC-ETS 活性的数据拟合关系如图4。从中可知, 系统 COD 的去除虽然主要依赖于微生物氧化污染物的作用完成, 但 TTC-ETS 活性与 COD 去除率并非绝对正相关。当 TTC-ETS 活性为 41.0 mg(g·h) 时, COD 去除率达到最高值 84.4%, 而 TTC-ETS 活性继续升高却导致系统 COD 去除率的下降, TTC-ETS 活性达到最

高值 60.11 mg(g·h) 时, COD 去除率反而降低至 65.1%。初步分析认为, 当曝气池内 TTC-ETS 活性升高时, 活性污泥中微生物菌群生长旺盛, 生物活性增强, 造成系统内活性污泥离散, 不易形成菌胶团, 部分活性污泥出现了解絮状态, 随水流出, 从而造成了 TTC-ETS 活性增高, 而 COD 去除率下降的现象。

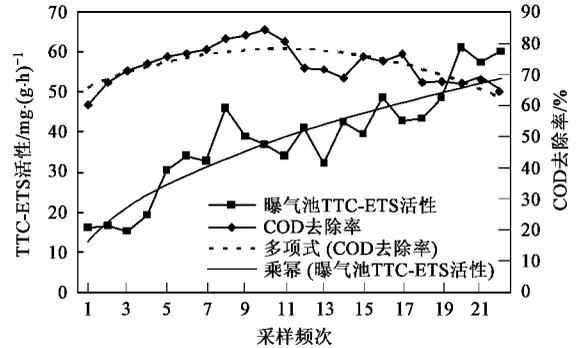


图4 系统 COD 去除率与曝气池 TTC-ETS 活性关系

Fig.4 Relationship between COD removal and TTC-ETS activity

在温度实验阶段, 系统运行稳定, 没有人工调整运行参数的干扰, 与实际运行中系统的运行状况接近, 因此观察该阶段 TTC-ETS 活性变化对 COD 去除率的影响可以分析 TTC-ETS 活性变化与 COD 去除率的相关关系。如图5所示, 随温度的升高, 曝气池中活性污泥 TTC-ETS 的活性呈现上升趋势, 而系统的 COD 去除率也同步增加, 两者呈正相关关系, 表明在系统正常运行条件下, 活性污泥 TTC-ETS 活性的变化与系统 COD 去除密切相关。

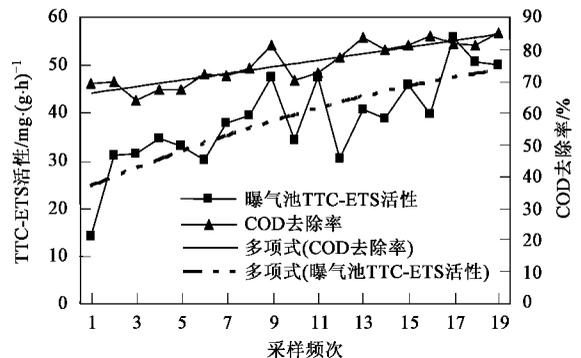


图5 TTC-ETS 活性对 COD 去除率的影响

Fig.5 Effect of TTC-ETS activity on COD removal

采用 SPSS13.0 对曝气池中活性污泥 TTC-ETS 的活性和系统 COD 去除率进行 Bivariate 两变量线性相关性分析, 结果表明, 曝气池中活性污泥 TTC-ETS 活性与 COD 去除率之间的相关系数 $R = 0.667$, $p = 0.02 < 0.05$, 两者之间的相关性显著, 表明 TTC-

ETS 活性的大小变化直接影响系统 COD 去除率。由此可见,采用 TTC-ETS 活性的监测方法可有效预见系统有机污染物的去除状况。

3 TTC-ETS 活性在 A²/O 系统运行监测中的应用

采用不同浓度的低 C/N 废水冲击 A²/O 系统, TTC-ETS 活性和 COD 去除率变化趋势如图 6 所示。从中可知, TTC-ETS 活性变化对低 C/N 废水的冲击较为敏感,在系统受到低 C/N 废水冲击的初始阶段, TTC-ETS 活性出现了短暂升高,这与微生物的应激反应有一定关系^[19],当 C/N = 2.8 时 TTC-ETS 活性出现了明显下降,表明此时系统中微生物的代谢活性受到明显抑制, C/N = 2 时微生物活性基本降至最低,在 0 附近,而系统 COD 去除率在 C/N = 2.3 时才出现明显下降, C/N = 1.9 时 COD 去除率降至最低,相比 TTC-ETS 活性的变化有明显的滞后性。

因此,采用测定系统中活性污泥微生物 TTC-ETS 活性的方法监测系统对有机污染物的降解,相比常规指标对非正常运行状态的监测反应更加灵敏,可在水质指标未出现明显变化的情况下,提前预警反应系统出现的异常状况。

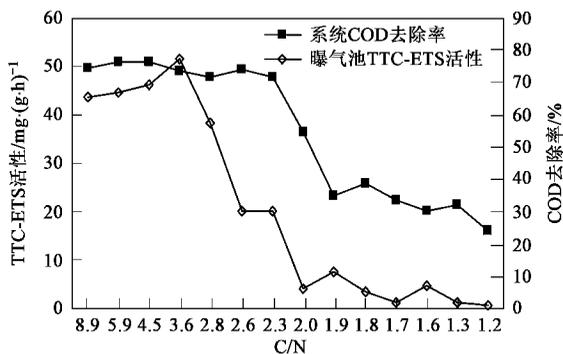


图 6 异常状态下 TTC-ETS 活性和 COD 去除率的变化

Fig.6 Variation of TTC-ETS activity and COD removal at abnormal state

在 A²/O 系统受冲击后的自我修复阶段, TTC-ETS 活性与 COD 去除率变化情况如图 7 所示,污泥 TTC-ETS 活性和 COD 去除率成正相关变化趋势,两者均在较短时间内得到恢复,表明受到低 C/N 废水冲击后的 A²/O 系统内有机污染物去除功能恢复的较快。

采用 SPSS13.0 对修复阶段曝气池内 TTC-ETS 活性和 COD 去除率进行 Bivariate 两变量线性相关性分析,结果表明,修复阶段的 TTC-ETS 活性和 COD 去除率相关系数 $R = 0.842$, $p = 0.004 < 0.01$,两者之间有极为显著的相关关系,说明修复阶段 A²/O 系统的 COD 去除主要依赖活性污泥中微生物 TTC-ETS

活性的修复与增强,因此,监测 TTC-ETS 活性也可用于间接反映异常冲击后处于自我修复阶段的系统内有机污染物去除功能的修复情况。

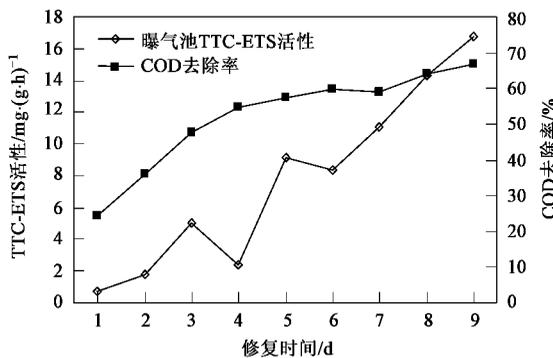


图 7 修复阶段 COD 去除率与 TTC-ETS 活性的变化

Fig.7 Variation of TTC-ETS activity and COD removal at restoration state

4 结论

(1) 温度低于 30℃ 时, TTC-ETS 活性介于 13.2 ~ 45.8 mg(g·h), 温度升高可促进 TTC-ETS 活性增加, 温度高于 30℃ 后, TTC-ETS 活性最大平均值为 52.2 mg(g·h); F/M BOD₅ 低于 0.35 g(g·d) 时, TTC-ETS 活性介于 16.2 ~ 48.3 mg(g·h), F/M 与 TTC-ETS 活性变化成正相关, 高 F/M 条件下 TTC-ETS 活性最大值约为 60 mg(g·h)。

(2) 并非 TTC-ETS 活性越大 COD 的去除率越高, 当 TTC-ETS 活性达到 41.0 mg(g·h) 左右时, COD 去除率达到最高值 84.4%, 过高的 TTC-ETS 活性反而导致系统 COD 去除率的下降, 当 TTC-ETS 活性达到 60.11 mg(g·h) 时, COD 去除率降低至 65.1%。

(3) TTC-ETS 活性与系统的 COD 去除率相关性显著, 可用于表征 A²/O 系统内有机污染物的去除状况, 并且相对于常规水质指标, 能更加迅速、灵敏地反应系统运行中存在的异常问题, 预警系统不正常运行状态。

参考文献:

- [1] Chung Y C, Neethling J B. Microbial activity measurements for anaerobic sludge digestion[J]. Journal WPCF, 1989, 61(3): 343-349.
- [2] 洪梅. 脱氢酶活性检测技术在污水处理厂的应用研究[J]. 石油化工环境保护, 2001, 4: 30-33.
- [3] Shaffi S A. Comparison of the sublethal effect of mercury and lead on visceral dehydrogenase system in three inland teleosts[J]. Phy siol Res, 1993, 42(1): 7.
- [4] 徐亚同, 黄民生. 废水生物处理的运行管理与异常对策[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [5] Klapwijk A, Drent J, Steenvoorden J H A M. A Modified Procedure

- for the TTC-dehydrogenase Test in Activated-sludge[J]. Wat Res , 1974 **8** :121-125.
- [6] 周春生,尹军. TTC-脱氢酶活性检测方法的研究[J].环境科学学报,1996 **16**(4):400-405.
- [7] Nielsen R H. Measurement of the Inhibition of Respiration in Activated Sludge by a Modified Determination of the TTC-dehydrogenase Activity[J]. Wat Res ,1975 **9**(12):1179-1185.
- [8] 尹军,付瑶,王翠兰,等.活性污泥的基质代谢脱氢酶活性的测定[J].中国给水排水 2002 **18**(9):50-52.
- [9] 谭学军,尹军,王建辉,等. SBR 工艺系统中污泥的 TTC-ETS 活性变化[J].中国给水排水 2006 **22**(1):41-49.
- [10] 唐宁,柴立元,闵小波,等.厌氧污泥体系脱氢酶活性表征细菌数的研究[J].微生物学杂志 2005 **25**(2):31-34.
- [11] 孟雪征,曹相生,曹磊. Mo⁶⁺ 对活性污泥系统反硝化性能的影响[J].生态环境 2006 **15**(2):216-218.
- [12] 史家,徐亚同,张圣章.环境微生物学[M].上海:华东师范大学出版社,1993.363-367.
- [13] 周健,程吉建,龙腾锐.采用脱氢酶进行 AB 工艺 A 段细菌增殖及污泥产生规律的研究[J].给水排水 2004 **30**(8):45-49.
- [14] 牛志卿,刘建荣. TTC-脱氢酶活性测定法的改进[J].微生物学通报,1994 **21**(1):59-61.
- [15] 谭学军,尹军,唐利,等.用 TTC-ETS 活性表征污泥生物活性的可行性研究[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2005 **21**(5):566-571.
- [16] 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.
- [17] 严媛媛,孙力平,冯雷雨. SBR 法处理还原段 DSD 酸废水脱氢酶活性的研究[J].环境科学与技术 2007 **30**(3):87-90.
- [18] 上海市环境保护局.废水生化处理[M].上海:同济大学出版社,1999.152.
- [19] 尹军,谭学军,任南琪.用 TTC 与 INT-电子传递体系活性表征重金属对污泥活性的影响[J].环境科学 2005 **26**(1):56-62.