

3种生物处理方式对污泥减量效果的比较及优化

梁鹏¹, 黄霞^{1*}, 钱易¹, 杨乃鹏²

(1. 清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 2. 中国矿业大学化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要:通过间歇试验得到3种生物方式(污泥好氧消化、厌氧消化以及颤蚓摄食)对污泥的比减量速率、污泥减量速率和污泥减量比例。当初始污泥浓度为 $2\,500\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 经过24h减量, 颤蚓摄食、厌氧消化和好氧消化3种方式对污泥的比减量速率 R 分别为 $0.13\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$, $0.09\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.03\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$, 对污泥的减量速率分别为 $315\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$, $263\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $65\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 。通过细菌荧光染色和脱氢酶活性检测证实颤蚓摄食在短时间内对污泥中细菌细胞膜的破坏程度最大, 可以将颤蚓摄食和厌氧消化相组合强化对污泥的减量。对于初始浓度为 $2\,500\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的污泥, 颤蚓摄食12h后再厌氧消化36h, 可以在2d左右使污泥减量的比例达到30%, 减量比速率为 $0.25\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$ 。当初始污泥浓度增加到 $4\,240\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 颤蚓摄食时间需要延长到24h方能保证组合工艺对污泥最大程度地减量。

关键词:污泥减量; 颤蚓摄食; 厌氧消化; 好氧消化

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)11-2339-05

Comparison of Three Bio-methods for Sludge Reduction and Their Optimization

LIANG Peng¹, HUANG Xia¹, QIAN Yi¹, YANG Nai-peng²

(1. State Key Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Chemistry and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Three bio-methods for sludge reduction including aerobic digestion, anaerobic digestion and predation by *T. tubifex* were investigated. The sludge reduction rates in 24h by predation of *T. tubifex*, anaerobic digestion and aerobic digestion were $0.13\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$, $0.09\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$ and $0.03\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$ respectively, when sludge concentration was $2\,500\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. *T. tubifex* could destroy the cell membrane of the bacteria in a short time, which could increase the sludge reduction rate when anaerobic digestion was adopted after the predation of *T. tubifex*. Using the *T. tubifex* to reduce sludge for 12h combined with anaerobic digestion for 36h could reduce sludge by 30%, and the sludge reduction rate was $0.25\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$. If the initial sludge concentration increased, the time of predation by *T. tubifex* should be extended.

Key words: sludge reduction; predation by *T. tubifex*; anaerobic digestion; aerobic digestion

城市污水生物处理过程中会产生大量的剩余污泥, 剩余污泥处理处置不当会造成严重的二次污染, 现有污泥处理处置所需资金较高, 使得污泥问题成为人们关注的热点^[1,2]。目前剩余污泥的减量方式可以分为物理方式、化学方式和生物方式。由于物理方式所需能量较大, 化学方式需要投入的化学物质可能给环境带来二次污染, 存在经济和环境两方面的问题。利用生物方式对污泥进行减量, 虽然对污泥的减量程度有限、减量稳定性有待加强, 但由于能耗低、不产生二次污染, 作为一种生态工程技术受到关注^[3~6]。

按照污泥减量过程中起作用的微生物及所维持的环境(厌氧/好氧)可以将污泥的生物减量方式分为: 污泥的好氧消化减量、污泥的厌氧消化减量和利用微型动物摄食对污泥进行减量3种方式。本研究在比较污泥的3种生物减量方式的基础上对其进行

优化。

1 材料与方法

1.1 试验装置

利用静态试验比较3种生物方式对污泥的减量效果, 使用污泥量均为500mL。污泥的好氧消化减量试验以500mL三角瓶作为反应场所, 微孔曝气头曝气; 污泥的厌氧消化减量试验以500mL带有橡胶塞的玻璃瓶作为反应场所, 试验开始时系统在纯氮气下曝气3min后密闭, 每4h摇动一次; 颤蚓摄食污泥的试验以500mL三角瓶作为反应场所, 微孔曝气头曝气(曝气主要维持系统溶解氧高于 $2\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),

收稿日期: 2006-03-01; 修订日期: 2006-05-07

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研项目(20020003041)

作者简介: 梁鹏(1976~), 男, 博士, 主要研究方向为污水资源化技术, E-mail: liangpeng@mail. tsinghua. edu. cn

* 通讯联系人, E-mail: xhuang@tsinghua. edu. cn

试验开始时投加颤蚓湿重为 10g,在以前的研究中发现颤蚓在该投加密度下对污泥减量速度最大^[3].所有试验维持温度 25℃ 恒定.试验所用颤蚓购于观赏鱼市场,经过催吐(0.4% NaCl)、消毒(0.000 1% NaClO)后挑选体长大于 3cm 的颤蚓作为摄食污泥的微型动物,以试验污泥作为食物长期饲养.

1.2 测试项目

主要测试项目包括 TSS、VSS 以及 2 种评价污泥中细菌活性的指标:脱氢酶活性和荧光染色活菌计数(BAClight),见表 1.其中污泥浓度测定中每次用移液管取样 20mL.

表 1 测试项目及方法		
Table 1 Analysis items and methods		
测定项目	测试方法	仪器型号
TSS	定量滤纸过滤后 105℃ 烘干称量 ^[7]	DHG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱
VSS	马弗炉 550℃ 灼烧后称量 ^[7]	TM-0912S 陶瓷纤维马弗炉
脱氢酶活性	分光光度法 ^[8,9]	SHIMADZU UV1200V
活菌荧光染色	荧光分光光度法 ^[10-12]	F-2500 荧光分光光度计

1.3 污泥减量效果的评价指标

采用如下 3 种方法评价污泥的减量效果:
污泥比减量速率 $R = (S_i - S_{i+1}) / (t \times S_i)$,其中 S_i 表示减量前污泥浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), S_{i+1} 表示经过时间 $t(\text{d})$ 减量后的污泥浓度. R 表示单位污泥单位时间内减少的污泥量(衡量所采用的方法对单位污泥的减量能力),单位: $\text{mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$;

污泥减量速率 $E = (S_i - S_{i+1}) / (t \times V)$,其中 S_i 、 S_{i+1} 和 t 与前述一致, V 为污泥所占体积(L). E 表示单位反应器单位时间减少的污泥量(衡量所采用的单位体积反应器的污泥减量能力),单位: $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$;

污泥减量比例 $R_r = (S_i - S_{i+1}) / S_i$, R_r 考察一定量污泥最终能够减少的比例,单位 %.

所有试验均安排 3 次平行试验,取其平均值作为试验结果,将 3 次平行试验结果标准偏差作为误差限.

2 结果与讨论

2.1 3 种生物减量方式的污泥减量效果

在初始污泥浓度为 $2\,500\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,分别考察了好氧消化、厌氧消化以及颤蚓摄食 3 种方式在 24h 内对污泥的减量效果,如图 1. 由该结果计算得到颤蚓摄食、厌氧消化和好氧消化的污泥比减量速

率 R 分别为 $0.13\text{mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$, $0.09\text{mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.03\text{mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$;污泥减量速率 E 分别为 $315\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, $263\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $65\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$; 24h 后污泥减量比例分别为 2.6%、8.5% 和 12.6%. 比较其它文献有关污泥厌氧消化减量、好氧消化减量和微型动物减量效果,如表 2 所示.污泥的厌氧消化减量和好氧消化减量与污泥起始浓度相关,但从污泥比减量速率和污泥减量速率来看,污泥的好氧消化减量和厌氧消化减量速率都要低于微型动物对污泥的摄食速率.

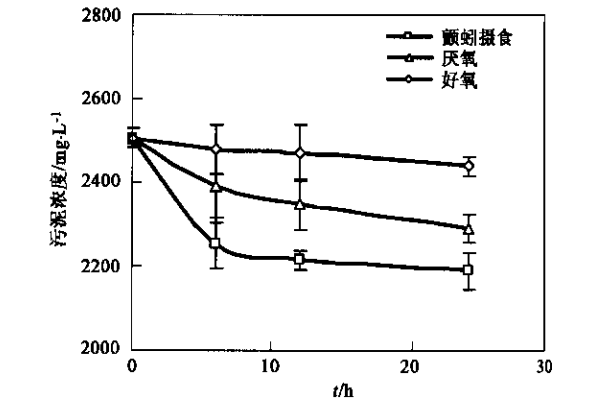


图 1 3 种方式的污泥减量效果
Fig. 1 Sludge concentration changes in three bio-methods for sludge reduction

表 2 3 种污泥减量方式对污泥的减量速度比较				
Table 2 Comparison of three bio-methods for sludge reduction				
减量方式	污泥比减量速率 R / $\text{mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$	污泥减量速率 E / $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$	起始污泥浓度 S_i / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	数据来源及主要参数
厌氧减量	0.05	425	8 500	连续运行,文献[5]
	0.09	263	2 500	本间歇试验结果
	0.03	75	2 500	本间歇试验结果
	0.039 7	416	10 653	30℃, 12d, 文献[13]
	0.03	390	13 000	间歇试验,文献[14]
好氧减量	0.048	419	8 704	间歇试验,文献[15]
	0.009 27	116(连续) 125(间歇) 215	13 454	微氧、间歇/连续运行,文献[16]
		602	113 454	微氧、连续(中试),文献[17]
		1 163	13 896	连续运行,文献[18]
				最大半速率常数,文献[19]
颤蚓摄食	0.4	1 130	2 500	连续试验,文献[3]
	0.13	315	2 500	本间歇试验结果

图 1 还表明,3 种减量方式中污泥浓度随时间的变化趋势不同,在颤蚓对污泥的减量试验中污泥浓度在初始阶段下降最大,前 6h 的比减量速率高达 $0.31 \text{ mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$,但随着时间的增加,对污泥的减量速度降低;而厌氧减量和好氧减量在 24h 内对污泥的减量速度变化不大。

2.2 3 种减量方式对污泥中细菌活性及有机物含量的影响

试验 12h 后检测污泥中细菌特性,通过荧光染色对污泥进行染色确定污泥中细菌细胞膜的完整程度(采用 Molecular Probes 公司生产的 LIVE/DEAD® BacLight™ 染色试剂盒);通过刃天青还原实验测定污泥中脱氢酶活性,结果如图 2。颤蚓摄食后单位体积污泥染色后发射绿色荧光光强(cd)和脱氢酶活性(dehydrogenase activity, DHA)(单位 $\text{nmol} \cdot \text{h}^{-1}$)均下降最大,而厌氧和好氧消化 2 种方式对污泥中细菌活性和细胞膜完整性的影响要小一些。通过颤蚓摄食对污泥进行减量在短时间内可以迅速破坏污泥中细菌的细胞膜,同时降低污泥整体活性,颤蚓摄食对细菌细胞膜的破坏和细菌活性的降低要高于厌氧和好氧环境对细菌的影响。Pavlostathis 等人的研究指出,水解是厌氧消化的限制性步骤,污泥细胞壁的刚性结构可以阻碍胞内易降解物质的水解。颤蚓摄食导致细菌细胞膜等结构的破坏程度要大于厌氧和好氧条件,使颤蚓摄食后的污泥再进行厌氧消化的减量效果得到加强^[20]。

主要集中在污泥的有机物部分,如果颤蚓过度摄食将大幅度降低污泥中的有机物含量,对后续的污泥厌氧消化减量可能产生不利影响。

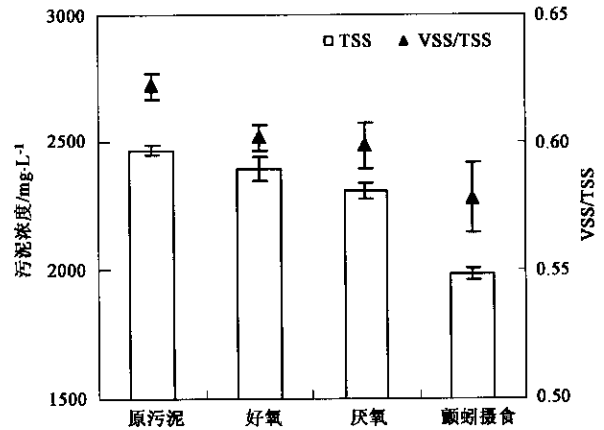


图 3 3 种方式对污泥有机物含量的影响

Fig. 3 Organic contents in three bio-methods for sludge reduction

2.3 颤蚓摄食 + 厌氧消化组合工艺对污泥的减量效果

图 4 中的组合工艺是颤蚓摄食污泥 24h 以后将颤蚓从污泥中分离,剩余的污泥再经过厌氧消化,在厌氧条件下进一步对污泥进行减量。在该条件下,组合工艺对污泥的减量速率可以达到 $0.12 \text{ mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$,略低于颤蚓直接对污泥减量的最大速率,高于单纯厌氧减量速率。

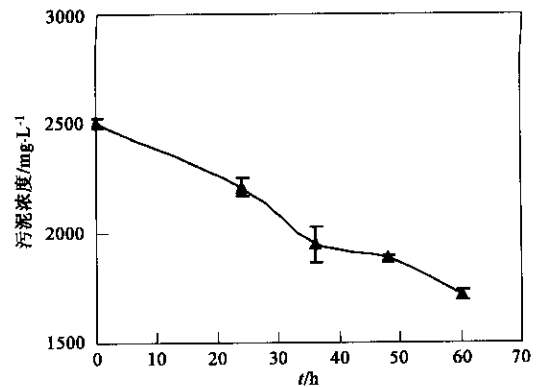


图 4 颤蚓摄食 + 厌氧消化组合工艺对污泥的减量效果

Fig. 4 Sludge reduction by the combined process

由图 4 可见,将颤蚓摄食和厌氧消化 2 种方式结合起来可以强化对污泥的减量效果,但颤蚓摄食污泥的持续时间是组合工艺的关键参数。图 5 表示了不同颤蚓摄食时间,组合工艺对污泥的减量效果。

污泥减量比例随着颤蚓摄食时间和污泥厌氧消化时间的增加而增加。由于颤蚓摄食可以破坏细胞

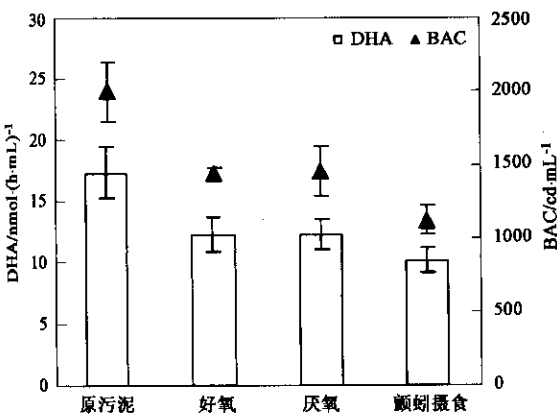


图 2 3 种方式对污泥中细菌细胞膜完整性和活性的影响

Fig. 2 DHA and BAC measurement results of sludge in three bio-methods for sludge reduction

试验 12h 后检测污泥 VSS 和 TSS 的比例如图 3,采用 3 种生物方式对污泥进行减量,其 TSS 和 VSS/TSS 都一同下降,说明生物方式对污泥的减量

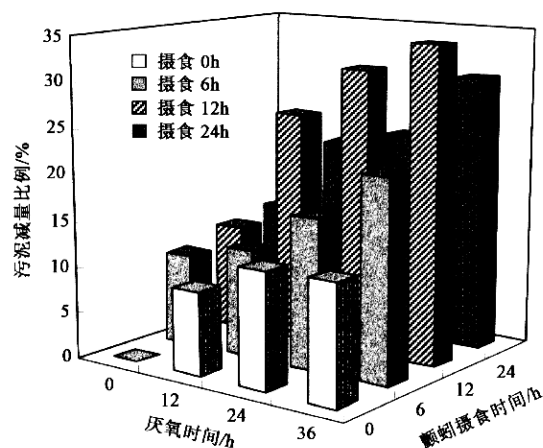


图5 颤蚓摄食+厌氧组合污泥减量工艺参数的优化

Fig.5 Optimization of the combined process for sludge reduction

膜等刚性结构,使得后续厌氧过程中污泥的减量速率得以加快,但颤蚓摄食时间过长会导致摄食后剩余污泥有机物含量下降,而厌氧过程对污泥的减量主要在有机物部分,当污泥中有机物含量下降过多时,厌氧消化对污泥的减量程度就不明显了。

在污泥浓度为 $2\,500\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,利用组合工艺对污泥进行减量,其中颤蚓摄食时间维持在12h比较合适,污泥减量比速率为 $0.25\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$ 。在颤蚓摄食污泥12h后再进行厌氧消化减量36h,污泥减量比例可大于30%。达到相同比例的减量程度,如果是好氧消化减量则需要11d,单纯厌氧消化需要4d左右,而组合工艺只需要1.5~2d就能完成,极大缩短了处理所需时间。

2.4 初始污泥浓度对颤蚓摄食+厌氧组合工艺参数的影响

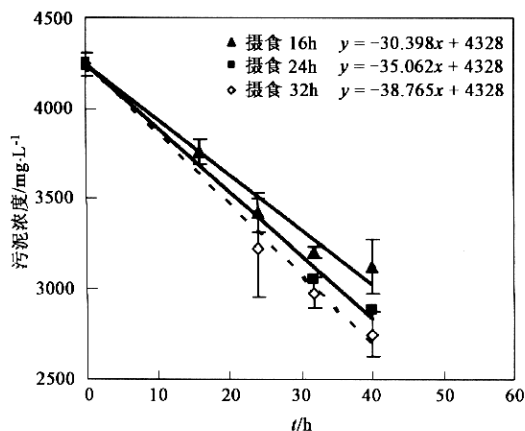


图6 初始污泥浓度 $4\,240\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时
组合工艺对污泥的减量效果

Fig.6 Sludge reduction by the combined process
at sludge concentration of $4\,240\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

将初始污泥浓度由 $2\,500\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $4\,240\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,考察在组合工艺中污泥浓度的变化,如图6所示。在颤蚓摄食分别为16h、24h和32h后再分别进行厌氧消化24h、16h和8h(维持总的处理时间40h),40h内平均污泥比减量速率分别为 $0.17\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$ 、 $0.22\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.20\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$ 。颤蚓摄食24h后再进行厌氧消化时污泥比减量速率最大。该污泥浓度条件下的最合适的颤蚓摄食时间比初始污泥浓度为 $2\,500\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时颤蚓摄食的最合适时间12h要长,说明不同污泥浓度需要颤蚓摄食的时间不同,污泥浓度增加,颤蚓摄食时间需要延长。

3 结论

(1) 3种污泥的生物减量方式中,颤蚓摄食对污泥的比减量速率最大,其次为厌氧消化,好氧消化的最低。

(2) 颤蚓摄食可以在短时间内破坏污泥中细菌的细胞膜,之后可以利用厌氧消化进一步对污泥进行减量。

(3) 将颤蚓摄食和厌氧消化结合对污泥进行减量,可以在2d左右使污泥减量比例提高到30%,减量比速率为 $0.25\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$ 。

(4) 初始污泥浓度增加,在颤蚓摄食+厌氧组合污泥减量工艺中需要适当增加颤蚓摄食污泥的时间。

参考文献:

- [1] 梁鹏,黄霞,钱易,等.污泥减量化技术的研究进展[J].环境污染治理技术与设备,2003,4(1):44~52.
- [2] Wei Y S, Van Houten R T, Borger A R, et al. Comparison performances of membrane bioreactor (MBR) and conventional activated sludge (CAS) processes on sludge reduction induced by Oligochaeta[J]. Environ. Sci. Technol., 2003,37(14):3171~3180.
- [3] Liang P, Huang X, Qian Y, et al. Comparison of sludge reduction rates caused by the four micro-fauna's predation[J]. Bioresource Technology, 2006,97(6): 854~861.
- [4] Liang P, Huang X, Qian Y. Excess sludge reduction in activated sludge process through predation of *A. hemprichi*[J]. Biochemical Engineering Journal. Bioresource Technology, 2006,28(2): 117~122.
- [5] Chen G H, Kyoung-Jin A, Swastien S, et al. Possible cause of excess sludge reduction in an oxic settling anaerobic activated sludge process (OSA process)[J]. Water Research, 2003, 37: 3855~3866.
- [6] Wei Y S, Liu J X. The discharged excess sludge treated by Oligochaeta[J]. Water Science and Technology, 2005,52(10-11):265~272.

- [7] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 107~108.
- [8] 安立超, 钮虹, 曾栢, 等. 测定活性污泥脱氢酶活性的研究[J]. 污染防治技术, 1996, 9(3): 186~188.
- [9] 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): 400~406.
- [10] Haglund A L, Peter L, Erik T, *et al.* Depth distribution of active bacteria and bacterial activity in lake sediment[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2003, 46: 31~38.
- [11] Renye J A, Piggot J P, Daneo-Moore L, *et al.* Persistence of *Streptococcus mutans* in stationary-phase batch cultures and biofilms[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, 70(10): 6181~6187.
- [12] Lawrence J R, Chenier M R, Roy R, *et al.* Microscale and molecular assessment of impacts of nickel, nutrients, and oxygen level on structure and function of river biofilm communities[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, 70(7): 4326~4339.
- [13] 沈耀良. 污泥好氧消化处理工艺的研究[J]. 苏州城市建设环保学院学报, 1994, 7(1): 55~64.
- [14] 周春生, 云澍, 卜海. 剩余污泥好氧消化的生物降解性研究[J]. 重庆环境科学, 1995, 17(1): 27~30.
- [15] 赵一德, 吴志超. 城市污水厂污泥好氧处理可行性研究[J]. 上海环境科学, 1997, 16(10): 29~31.
- [16] 孙丰霞, 傅钢. 一种污泥稳定新方法——污泥微氧稳定法[J]. 污染防治技术, 2003, 16(4): 51~53.
- [17] 胡颖华, 孙丰霞, 高廷耀等. 活性污泥法污水厂剩余污泥微氧消化的中试研究[J]. 能源环境保护, 2005, 19(1): 28~31.
- [18] 蒋克彬. 剩余污泥的好氧消化设计[J]. 中国给水排水, 2002, 18(12): 54~55.
- [19] 尹军, 刘韬, 宋显东. 污泥好氧消化处理的若干问题探讨[J]. 中国给水排水, 2001, 17(8): 23~25.
- [20] Pavlostathis S G, Gossett J M. A kinetic model for anaerobic digestion of biological sludge [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1985, 28(10): 1519~1530.