

微曝氧化沟+BAF 污水深度处理能耗潜能分析与节能研究

时章明^{1,2}, 沈浩¹, 姜信杰¹, 陈通¹, 余煌¹

1. 中南大学能源科学与工程学院, 长沙 410083

2. 湖南节能评价技术研究中心, 长沙 410083

摘要 城市污水的深度处理必然成为未来发展的趋势, 污水处理的能耗问题已经引起人们的关注。某城市污水处理厂采用的是微曝氧化沟+生物曝气滤池 (BAF) 的污水深度处理工艺, 从该工艺处理流程的角度进行了能耗与工序潜能分析, 将能耗与潜能联系起来进行了研究。结果表明, 工序中微曝氧化沟耗电量最大, 占污水处理工艺总电耗的 54.59%, 其次是进水泵房、污泥泵房和出水泵房, 分别占总电耗的 13.49%, 9.56% 和 8.69%, 曝气系统和污水污泥的动力系统仍是耗能的重点; 整个处理工序中化学与生化潜能的减少量分别为 $231.6 \times 10^6 \text{ kJ/d}$ 与 $201.5 \times 10^6 \text{ kJ/d}$, 污水进水时所含的潜能量高于整个流程总能耗, 微曝氧化沟工序中能耗的上升与潜能的下降速度达到最快; 最后, 在此分析的基础上从工艺、电气设备和资源再利用 3 个方面提出了节能措施。

关键词 污水深度处理; 能耗; 潜能; 节能

中图分类号 TK01+9

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.12.009

Energy Consumption and Energy Potential of Miraco Bubble Aerated Oxidation Ditch & BAF and Measures of Energy Saving

SHI Zhangming^{1,2}, SHEN Hao¹, JIANG Xinjie¹, CHEN Tong¹, YU Huang¹

1. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

2. Hunan Research Center of Energy-saving Evaluation Technology, Changsha 410083, China

Abstract The advanced treatment of urban sewage and the related energy consumption are issues for concern. The wastewater treatment process of miraco bubble-aerated oxidation ditch and biological aerated filter is studied in this paper, its energy consumption and the process energy potential are analyzed from the perspective of the technical process. The results show that the maximum power consumption in the process of miraco bubble-aerated oxidation ditch accounts for 54.59% in the total power consumption, followed by those in water pumping stations, sludge pumping stations and water pumping stations, respectively, which account for 13.49%, 9.56% and 8.69% in the total power consumption. The aeration system and the sewage sludge dynamic system take still the most important part in the energy consumption. The reductions of chemical energy potential and biological energy potential in the entire process are $231.6 \times 10^6 \text{ kJ/d}$ and $201.5 \times 10^6 \text{ kJ/d}$. The potential energy in the sewage water is higher than the total energy consumption, the rates of the increase in the energy consumption and decrease in the energy potential are the greatest in the miraco bubble-aerated oxidation ditch. Some energy-saving measures are proposed for the process, the electrical equipment and the re-use of resources.

Keywords advanced treatment of sewage; energy consumption; potential energy; energy-saving

0 引言

环境保护和污染控制对繁荣经济与社会发展的重要性不言而喻, 随着城市规模不断扩大、人口逐渐增多, 大量的工

业废水和城市生活污水造成了巨大的水资源污染, 污水的处理备受人们关注。至 2011 年 3 月, 中国共有城镇污水处理厂 2996 座, 日污水处理能力达到 1.33 亿 m^3 , 其中绝大部分处理

收稿日期: 2011-08-22; 修回日期: 2012-03-28

作者简介: 时章明, 教授, 研究方向为资源综合利用、节能技术改造、节能评价, 电子信箱: av666999@163.com

厂的设计标准为二级处理。为了满足日益严峻的环境考验,少数发达国家已经开始推广配备中水回用系统和可再生水设备的城市污水处理厂,使出水水质达到更高标准^[1-2]。中国也从 2005 年左右开始升级一些处理厂为深度处理标准,污水的深度处理工艺将会成为未来发展的趋势。

随着污水处理量的增大与工艺的加深,能耗问题不容忽视。现时期中国的污水处理电耗约为 $0.2\text{—}0.4\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$, 比起发达国家仍有较大差距。国内外对污水处理能耗分析以及优化研究滞后于水质特性机理和应用的研究, 国外的学者通过大量实地调查给出了不同工艺较完整的能量需求分析^[3], 早期国内的羊寿生^[4]对污水处理的工序电耗进行了研究, 近年来杨凌波等^[5]得出了污水处理量与指标跟电耗的定量关系, 这些研究的对象都是一、二级处理工艺, 对于深度处理的能

耗分析较为欠缺,在研究中不仅要对各工艺中电量的消耗进行分析,也要了解工序中所含有潜能的消耗,使人们从宏观和微观的角度定量的认识到耗能与节能的重点。本研究对污水深度处理系统的能耗与潜能进行分析,可以更清晰的了解中国现阶段污水深度处理能耗的状况,并为今后新建城市污水处理厂指明节能的途径,具有重要意义。

1 污水深度处理工艺

本研究以某城市污水处理厂为对象,该厂使用的是“微曝氧化沟+生物曝气滤池(BAF)”污水深度处理工艺。城市污水通过这两段工艺的处理,出水可达《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)^[6]中的一级 A 标准。工艺流程如图 1 所示。

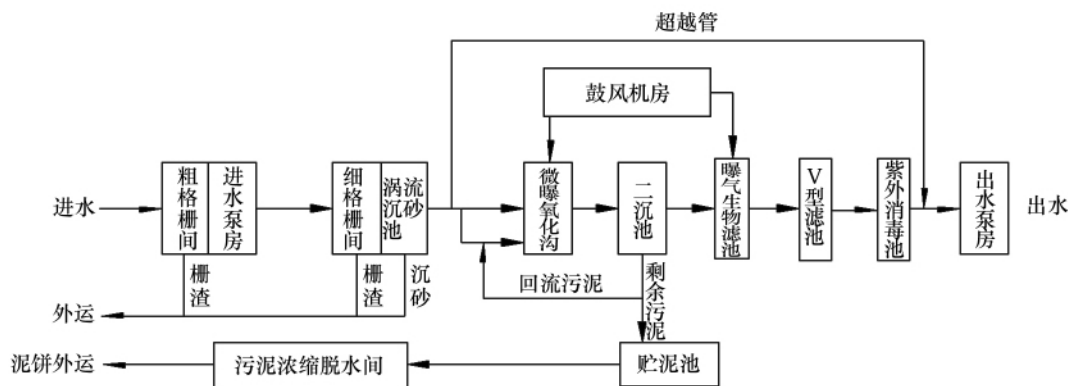


图 1 项目工艺流程示意

Fig. 1 Flowchart of the technical process

微曝氧化沟工艺是在 A²/O 氧化沟基础上,引入了微孔曝气,同时曝气头布置方式上做了改进,设置厌氧池、缺氧池和微曝氧化沟,用微曝氧化沟代替了传统 A²/O 工艺的好氧池,从而使总氮转移量增大,提高了氧利用率^[7]。该工艺对 NH₃-N 的降解率可达到 90%,P 的去除率达到 75%。

BAF 是一种新型微生物附着式污水处理工艺。它通过设在池底的配气系统曝气,使微生物可以在支撑介质上生长,该工艺主要依靠填料上生物膜的生物代谢、生物絮凝等作用达到净化污水的目的。生物曝气滤池可同时完成生物的处理与固液的分离,通过控制供氧使生物膜上的优势菌种分别为好氧菌和硝化菌,从而达到除碳及脱氮目的^[8]。

2 污水处理能耗与潜能计算及分析

2.1 各工序能耗分析

目前,中国城市污水处理厂的能耗评估指标一般为处理单位污水能耗($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$)或处理单位污染物能耗($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg BOD}_5$)^[9],所以本文采用这两种指标作为分析依据。该城市污水处理厂日处理污水能力为 $8\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$,并且工作稳定,经测试与计算得出整个工艺流程的能耗如表1所示。

表 1 处理系统各工序用能表

Table 1 Power consumption of each unit process

序号	工序	耗电量/(kW·h)	比例/%
1	粗格栅	29.16	0.08
2	进水泵房	5238.19	13.49
3	细格栅	79.92	0.21
4	涡流沉砂池	161.06	0.41
5	微曝氧化沟	21201.46	54.59
6	二沉池	105.6	0.27
7	污泥泵房	3715.2	9.56
8	曝气生物滤池	878.4	2.26
9	V型滤池	43.68	0.11
10	紫外消毒池	2285	5.88
11	污泥浓缩脱水车间	1273.5	3.28
12	出水泵房	3374.59	8.69
13	辅助	455	1.17
	合计	38840.76	100

由表 1 可知,在“微曝氧化沟+BAF”污水深度处理工艺流程中,日耗电量为 38840.76kW·h,可得处理单位污水能耗为

0.48kW·h/m³,处理单位污染物能耗为 4.04kW·h/kgBOD₅,该工艺相比起一般的二线城市污水处理工艺来说,能耗有较大的提高。

总电耗中,微曝氧化沟耗电量最大,为 21201.46kW·h/d,占污水处理工艺总电耗的 54.59%,该工序采用的是鼓风机曝气方式,鼓风机的耗电占到该工序电耗的 86.1%,推流器也占到工序电耗的 10.2%;其次是进水泵房、污泥泵房和出水泵房,分别占污水处理工艺总电耗的 13.49%、9.56%和 8.69%,泵机的节能与否对整个工序的能耗有较大的影响;此外,紫外消毒池耗电量也较多,占污水处理工艺总电耗的 5.88%,紫外线消毒有方便、快捷、安全等优点,但相比起其他普遍的消毒方式,其能耗较高。

同一般的二线城市污水处理厂能耗比例类似^[10],氧化沟的曝气系统和污水污泥的提升、进出系统仍是耗能的重点,需要广泛关注。具有脱氮除磷功能的深度处理工艺(即曝气生物滤池)只占总耗电量的 2.26%,对整体工艺能耗的影响较小,但其对出水水质的达标与否具有重要作用,所以仍是能耗分析的重点。

2.2 处理工艺的化学与生化潜能

有机物与无机物的生化降解过程伴随着能量的吸收与释放,所以对城市污水处理能耗的分析研究应该考虑潜能的因素。化学潜能(CEP)定义为有机物完全氧化为 CO₂ 和 H₂O 所释放的潜热(即热值)。生化潜能(BEP)定义为可生化降解的有机物完全氧化为 CO₂ 和 H₂O 所释放的潜热,BEP 就是总化学潜能的可生化降解部分^[11]。污水处理过程中有机物分解

的 BEP 流动如图 2 所示。

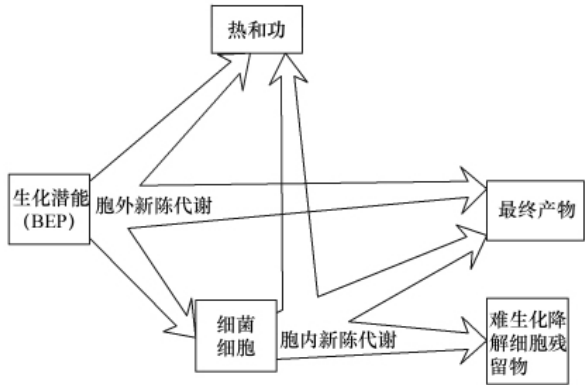


图 2 有机物细菌分解的能量流动示意图
Fig. 2 Energy flow diagram of organic matter bacterial decomposition

图 2 中最终产物为 CO₂ 和 H₂O,是稳定的化合物,不含潜能,有机物分解的 BEP 除了被微生物(细菌、细胞)利用维持其自身功能外,其余部分释放为热和功。

污水处理过程中有机物的降解主要发生在微曝氧化沟工序(包括微曝氧化沟和二沉池)、BAF 工序(包括曝气生物滤池和 V 型滤池),由各处理工序进出水水质的测试计算可得整体流程、微曝氧化沟工序、BAF 工序与污泥的潜能如表 2 所示。

表 2 处理过程中的潜能表
Table 2 Potential energy of wastewater treatment process

指标	能量及物料						
	污水处理整体工序		微曝氧化沟工序		BAF 工序		污泥
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	输出
$Q/(m^3 \cdot d^{-1})$	80000	80000	80000	80000	80000	80000	1368
$BOD_5/(kg \cdot d^{-1})$	10400	685	7215	1352	1352	685	—
$BOD_L/(kg \cdot d^{-1})$	15453	1002	10749	1923	1923	1002	3879
$BEP/(kJ \cdot d^{-1})$	215.4×10^6	13.9×10^6	149.8×10^6	26.8×10^6	26.8×10^6	13.9×10^6	54.1×10^6
$COD/(kg \cdot d^{-1})$	19600	2985	12596	4690	4690	2985	5651
$CEP/(kJ \cdot d^{-1})$	273.2×10^6	41.6×10^6	175.6×10^6	65.4×10^6	65.4×10^6	41.6×10^6	78.8×10^6

表 2 中, Q 为流量,BOD₅ 为五日生化需氧量,BOD_L 为完全生化需氧量,BEP 为生化潜能,COD 为化学需氧量,CEP 为化学潜能。从表 2 中可以看出,污水进入处理工序前自身具有很大的化学与生化潜能,折算为标煤达到 9322kgce/d 与 7350kgce/d;整个处理工序中化学与生化潜能的减少量为 231.6×10⁶kJ/d 与 201.5×10⁶kJ/d,其中在微曝氧化沟工序和 BAF 工序中的生化潜能减少量为 123×10⁶kJ/d 和 12.9×10⁶kJ/d,化学潜能减少量为 110.2×10⁶kJ/d 和 23.8×10⁶kJ/d。污水处理

工艺中产生的污泥也含有有机物,其化学与生化潜能也达到 54.1×10⁶kJ/d 和 78.8×10⁶kJ/d。

在潜能减少量中被微生物利用的只占小部分,其余的以热与功的形式释放在工序中,未被利用,微曝氧化沟工序和 BAF 工序中有机物降解产生的这部分能量的再利用应该被重点关注,污泥的后续处理也应该考虑利用污泥中所含的能量。整个污水深度处理工艺流程的能耗累积与潜能降低走势如图 3 所示(图中所有能量折算为标煤表示)。

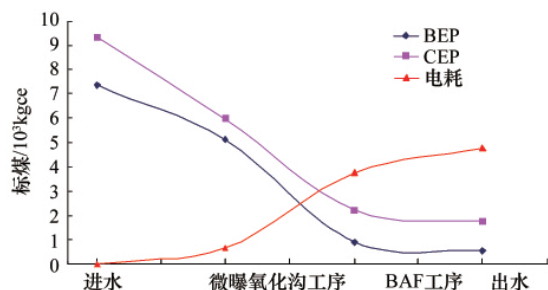


图3 污水处理流程能耗与潜能走势图

Fig. 3 Energy consumption and energy potential in wastewater processing

对比整个污水深度处理工艺流程中能耗与潜能的走势可以看出,污水进水时所含的潜能量高于整个流程总能耗;在预处理工序(粗格栅、细格栅与沉砂池)中,污水所含的部分悬浮物被拦截后脱离整个流程,所以污水的潜能下降较为明显,而系统的能耗上升较为缓慢;在微曝氧化沟工序中能耗的上升与潜能的下降速度达到最快,后续工序能耗的上升与潜能的下降趋于平稳。

2.3 节能研究

(1) 工艺节能

污水处理工艺的选择以及流程的设计对处理的能耗有很大的影响,设定适当进水参数与处理深度是整个工艺节能的关键。

进水水质的设计参数不应以高浓度进水为依据,过大的预留量会造成工艺系统经常低负荷运行与能源的浪费。应当采用耐冲击负荷的工艺来解决进水高低峰的问题,如在生化处理阶段,可以将处理构筑物分为多组,污水量较小或低浓度时期可单组或单池运行,减少不必要的能源浪费。

研究中微曝氧化沟采用的是微孔曝气方式,池内气泡的直径很小,氧传质速率较直径大的气泡快,可以使总氧转移量增大,提高氧的利用率,但除了气泡直径,水体的溶解氧(DO)还与气泡在池中的分布和气泡自身的生命周期有关^[12-13],所以要综合考虑曝气池的几何形状,曝气器的深度、气孔因素等,利用实验或模拟的方式预测曝气的最佳效果,实现最优化的运行。BAF工序采用水气复合上升流程,水气均分的非常好,避免了气泡在滤料层中的气堵现象,填料具有截留SS,代替二沉池的功能,节省了工艺流程,水力负荷与容积负荷高于传统工艺,供氧动力消耗较低。但是,BAF工序对进水的SS要求较高,填料粒径过细使水头损失较大,所以该工艺对上一工序的出水水质与动力要求较高,合理的协调工序之间物质与动力的传输是其节能的关键。紫外线消毒工艺在北美等国家比较普及,但在中国该方法的研究与应用还非常有限^[14],电耗较高是其最大的弊端,继续深入研究其节电的方法,根据需实现智能的强度调控对紫外线消毒技术的推广将具有深远的影响。

(2) 电气设备节能

研究中污水提升及输送与曝气系统的能耗占到了流程

总能耗的31.74%和56.85%,其最主要的耗能设备就是水泵与鼓风机。在设计初期,应该依托工厂地形合理的确定泵的扬程,避免选择的扬程过高使泵的电耗增大,根据进水高低峰采用变频调速装置使泵的效率达到最高,同时,考虑系统其他条件的约束,合理的设置泵站的位置,把传动装置、泵、管道与控制室等单元有机的结合起来,使整个流程的水头损失最小化;风机选择的两个关键因素是压力与流量,应该根据实验或现有经验合理的确定曝气所需克服的阻力与压力,正确的选择风机功率,不同的流量范围风机的性能有很大差异,现时期主流的罗茨式、离心式风机的性能研究比较完善^[15],可以根据工序参数的设定选择节能高效的风机。

此外,在推流方式上,应当采用潜水推进器,叶轮产生的水流推动直接作用到水中,使水流由下层向上层传递,减少能量消耗;工厂应选用节能型变压器,将变配电所的位置深入负荷中心——进水泵房、微曝氧化沟等附近,以减少长期运行所造成的线路损失;在变压器的低压侧采用电容器进行集中及分散补偿,可以使电网的功率因数达到0.9以上;同时配套先进的微机测控管理系统,分散检测和控制,根据污水水质、流量等参数自动调节工艺设备的运转台数与运行时间,使工艺流程达到高度的自动控制。

(3) 资源再利用

由处理流程潜能的分析可知,预处理工序的栅渣带走的潜能(主指BEP)为 $65.6 \times 10^6 \text{ kJ/d}$,最终污泥含有的潜能为 $54.1 \times 10^6 \text{ kJ/d}$,可以利用厌氧处理的方式将这两部分的能量回收再利用,污泥与栅渣在厌氧消化时会产生沼气,利用沼气燃烧或发电可以为污水厂自身提供热能与电能来源,达到很好的能量再利用效果。同时,污泥的资源化利用不仅可以解决污泥后续处理的问题,还可以节省其他资源的消耗^[16],如消化后的污泥可以作为建材,可以用于堆肥等途径。

生化处理工序中(微曝氧化沟+BAF)污水的潜能减少量为 $135.9 \times 10^6 \text{ kJ/d}$,除去微生物消耗的能量与污泥中带走的部分,仍有非常大的潜能未被利用。目前,城市污水热能的资源化利用已经有很大发展,在哈尔滨、重庆等地区热泵技术应用于污水能量回收的实验也取得了一定的成果^[17];微生物燃料电池(MFC)的研究为从污水中回收能源开辟了新的途径,利用电化学技术,使微生物作为催化剂将可降解有机物中的化学能直接转化为电能^[18],在污水处理的同时将潜能回收。

3 结论

研究了微曝氧化沟+BAF污水深度处理工艺的能耗,得到了各个工序的耗电量与所占总电耗的比例,发现同一般的二级污水处理相同,氧化沟的曝气系统和污水污泥的传输系统仍是耗能的重点,说明污水深度处理的节能工作仍要关注这两方面。

分析计算了整个流程的潜能变化,污水进水时的潜能高于流程总能耗,随后逐渐降低,在预处理阶段和微曝氧化沟工序潜能下降的非常明显,定量说明了在生化处理阶段污水

潜能的范围,同时得到了污泥和栅渣所持有的能量,为这部分能量再利用给予了数据基础。

从三方面研究了该污水处理流程的节能方向,为以后污水深度处理的节能工作做出了一定指引。

参考文献 (References)

- [1] 张杰, 曹开朗. 城市污水深度处理与水资源可持续利用 [J]. 中国给水排水, 2001, 17(3): 20-21.
Zhang Jie, Cao Kailang. *China Water & Wastewater*, 2001, 17(3): 20-21.
- [2] Anderson J M. Integrating recycled water into urban water supply solutions[J]. *Desalination*, 2006, 187(1-3): 1-9.
- [3] 高旭, 龙腾锐, 郭劲松. 城市污水处理能耗能效研究进展[J]. 重庆大学学报, 2002, 25(6): 143-148.
Gao Xu, Long Tengru, Guo Jinsong. *Journal of Chongqing University*, 2002, 25(6): 143-148.
- [4] 羊寿生. 城市污水厂的能源消耗 [J]. 给水排水, 1984(6): 15-19.
Yang Shousheng. *Water & Wastewater Engineering*, 1984(6): 15-19.
- [5] 杨凌波, 曾思育, 鞠宇平, 等. 我国城市污水处理厂能耗规律的统计分析与定量识别[J]. 给水排水, 2008, 34(10): 42-45.
Yang Linbo, Zeng Siyu, Ju Yuping, et al. *Water & Wastewater Engineering*, 2008, 34(10): 42-45.
- [6] 北京市环境保护科学研究院, 中国环境科学研究院. 城镇污水处理厂污染物排放标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Chinese Research Academy of Environmental Sciences. Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [7] 薛永强, 汤兵, 区岳州. A/A/O 微曝氧化沟处理城市污水的工程设计 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(1): 126-128.
Xue Yongqiang, Tang Bing, Ou Yuezhou. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2006, 7(1): 126-128.
- [8] 李燕飞, 孙迎雪, 田媛, 等. 曝气生物滤池处理生活污水研究 [J]. 环境工程学报, 2011, 5(3): 575-578.
Li Yanfei, Sun Yingxue, Tian Yuan, et al. *Chinese Journal of*

Environmental Engineering, 2011, 5(3): 575-578.

- [9] 刘礼祥, 张金松, 施汉昌, 等. 城市污水处理厂全流程节能降耗优化运行策略[J]. 中国给水排水, 2009, 25(16): 11-15.
Liu Lixiang, Zhang Jinsong, Shi Hanchang, et al. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(16): 11-15.
- [10] 金昌权, 汪诚文, 曾思育, 等. 污水处理厂能耗特征分析方法与节能途径研究[J]. 给水排水, 2009, 35(Z1): 270-274.
Jin Changquan, Wang Chengwen, Zeng Siyu, et al. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 35(Z1): 270-274.
- [11] Owen W F. Energy in wastewater treatment [M]. Englewood Cliffs N J: Prentice Hall, 1982.
- [12] Capela S, Roustan M, Heduit A. Transfer number in fine bubble diffused aeration systems[J]. *Water Sci Technol*, 2001, 43(11): 145-152.
- [13] 李尔, 曾祥英, 范跃华. 微孔曝气最优气泡群的确定方法 [J]. 水处理技术, 2007, 33(7): 21-24.
Li Er, Zeng Xiangying, Fan Yuehua. *Technology of Water Treatment*, 2007, 33(7): 21-24.
- [14] 陈尧, 王向东. 紫外线消毒技术在污水处理中的应用[J]. 重庆环境科学, 2001, 23(3): 49-51.
Chen Yao, Wang Xiangdong. *Chongqing Environmental Science*, 2001, 23(3): 49-51.
- [15] 段立文, 黄志雄. 浅析污水处理厂风机选型 [J]. 环境技术, 2005(1): 46-48.
Duan Liwen, Huang Zhixiong. *Environmental Technology*, 2005 (1): 46-48.
- [16] Björklund J, Geber U, Rydberg T. Emergy analysis of municipal wastewater treatment and generation of electricity by digestion of sewage sludge[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2001, 31(4): 293-316.
- [17] 张雨. 城市污水热能资源化的研究及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
Zhang Yu. Study of urban sewage heat energy utilization and its application[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [18] Kim J R, Jung S H, Regan J M. Electricity generation and microbial community analysis of alcohol powered microbial fuel cells [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(13): 2568-2577.

(责任编辑 岳臣)

·学术动态·



“2012 中国农业机械学会国际学术年会”征文

由中国农业机械学会, 亚洲农业工程学会主办的“2012 中国农业机械学会国际学术年会”拟于 2012 年 10 月 20 日在江苏省杭州市召开。

论文截稿日期: 2012 年 6 月 30 日。

联系电话: 010-64882358。

会议网站: <http://www.agro-csam.org/News/article.asp?id=1656&classid=10>。