



# 中国污水处理电耗分析和节能途径

赵正权<sup>1,2</sup>, 徐冬<sup>1,2</sup>, 张浩<sup>1,2</sup>, 孙正滨<sup>2</sup>, 杨慧慧<sup>1,2</sup>, 周远<sup>1</sup>

1. 中国科学院理化技术研究所; 中国科学院低温工程学重点实验室, 北京 100190
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 随着中国污水处理量的增加和处理标准的提高, 污水处理电耗引起了广泛重视。本文针对中国污水排放及处理情况进行调研, 介绍了传统的污水处理方法和单元装置, 并对国内污水处理电耗进行分析。在污水处理电耗分析基础上, 指出污水处理合理设计的重要性, 通过分析污水进水量及成分, 选择合理高效的处理工艺, 能避免产生“大马拉小车”的能源浪费问题。其次指出了3种节电途径: 改进传统污水处理方法中的工艺单元, 如改进耗电较大的进水泵和曝气单元; 改进工艺流程, 如减少回流降低耗电; 开发处理污水节能新技术、新方法, 如人工湿地法、超导磁分离法。

**关键词** 污水处理; 电耗分析; 节能

**中图分类号** X799

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2010)22-0043-05

## Power Consumption of Wastewater Treatment and the Measures of Energy Saving

ZHAO Zhengquan<sup>1,2</sup>, XU Dong<sup>1,2</sup>, ZHANG Hao<sup>1,2</sup>, SUN Zhengbin<sup>2</sup>, YANG Huihui<sup>1,2</sup>, ZHOU Yuan<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** With the rapid increase of waste water treatment practice and the enactment of strict standards, the power consumption in wastewater treatment attracts more and more attention. In this paper, the wastewater discharge and treatment in China are reviewed. General methods and unit components of wastewater treatment are described and the power consumption is analyzed, which warrants a proper design. With an accurate analysis of wastewater volume and components, a proper process of high power efficiency is chosen to avoid the energy waste. Three ways to save power are proposed, that is, an improvement of unit components such as charging pump and aeration system, an improvement of the process flow such as removing the circumfluence, and the development of new techniques and methods of treatment such as constructed wetland wastewater treatment and superconducting high-gradient magnetic separation wastewater treatment.

**Keywords** wastewater treatment; power consumption; save power

### 1 国内污水排放情况

随着工业进步和社会发展, 全球水污染亦日趋严重, 成为环境治理难题之首。在中国, 由于人口的增长、工业化和城市化进程的加快, 工业污水和生活污水的排放量也逐年剧增。图1为中国1998—2008年的污水排放量, 10年内污水总

排放量由年排量400亿t剧增至近600亿t<sup>[1]</sup>。

就污水种类而言, 工业污水排放量约占污水总排放量50%<sup>[1-2]</sup>, 且与生活污水相比, 工业污水的污染物浓度大, 成分复杂, 不易净化, 对水体的污染更为严重, 目前全国532条主要河流中82%因工业污水受到不同程度的污染。

收稿日期: 2010-10-27; 修回日期: 2010-11-09

基金项目: 中国科学院院士咨询项目

作者简介: 赵正权, 硕士研究生, 研究方向为超导磁分离污水处理技术, 电子信箱: zhengquanwo@126.com; 周远 (通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: E120110051H, E120110051S), 中国科学院院士, 研究方向为低温工程技术, 电子信箱: yzhou@mail.ipc.ac.cn



就行业污水排放量而言,造纸、化学制品制造、纺织、电力四大行业的废水排放量约占工业污水总排放量的 50%,化学需氧量 (COD)排放量约占 60%,是污水处理的重点对象。

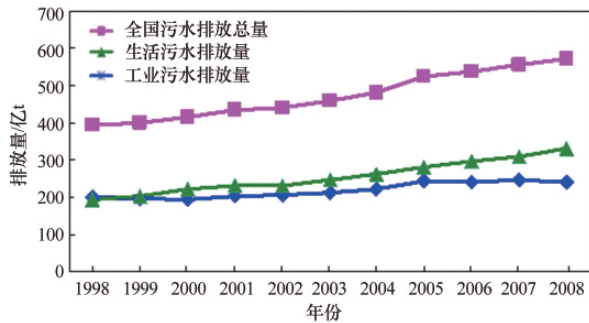


图 1 中国污水排放量 (1998—2008)

Fig. 1 Wastewater discharge in China (1998—2008)

由于中国各地区经济发展程度的不同和行业分布不均,各地区的污水排放量也相差较大。2008 年废水排放量在前 10 名的省份依次为广东、江苏、山东、浙江、广西、河南、四川、湖北、湖南和福建 (图 2)。这 10 个省份的排放总量为 355.9 亿 t, 约占全国废水排放量的 62.3%。污水处理因地制宜,根据当地污水排放量及污水成分,选择合适的污水处理方法,确定合理的污水处理厂规模。

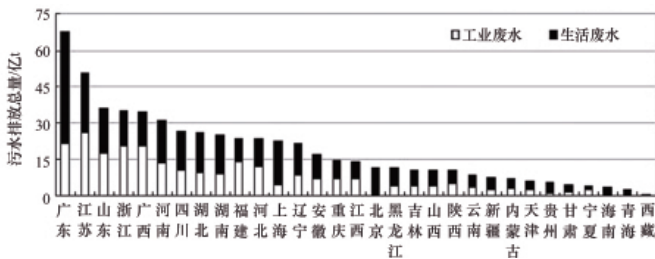


图 2 中国各地区污水排放量

Fig. 2 Wastewater discharge in different provinces of China

随着污水排放量的逐年剧增,中国不断加大污水处理力度,每年用于污水处理的投资经费不断增加,2003 年中国投入废水处理费用仅为 87.4 亿元,到 2008 年该投资项已增加近 3 倍 (图 3)。一方面是由于污水排放量的增大超出原处理厂负荷,新建了数批污水处理厂;另一方面是由于传统的污水处理吨水能耗过大,污水排放总量的增加和排放标准的提高带来能耗成倍数的增加。按目前发展趋势,到 2030 年每年处理污水费用将高达 1000 亿,若能降低 10% 电耗,就将有 100 亿元的节能空间。

然而目前使用的传统污水处理方法存在投资大、运行成本高、反应时间长、占地面积大、能耗高等诸多问题,对于中小企业的废水处理,这些问题则愈加突出,厂家若因建立污水处理设施,则投资过高,可能采取直排或偷排,给环境造成更大危害。因此开展新型、高效、节能、低成本工业废水处理技术的研究显得重要而迫切。

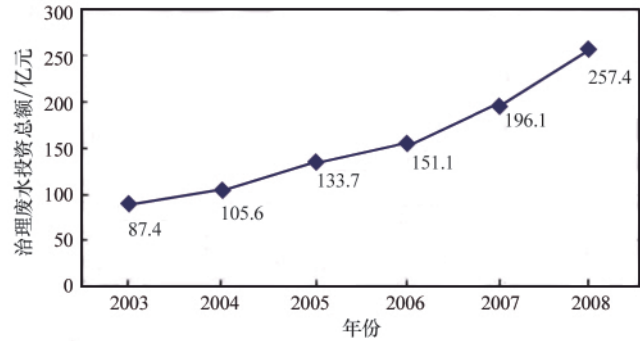


图 3 中国污水处理投资经费

Fig. 3 Investment of wastewater treatment in China

## 2 传统污水处理方法和单元装置介绍

污水的处理过程是将污水中污染物分解或与水分离,使其转化成无害和稳定物质,从而达到净化的目的。通常是针对污染物的不同特点,选用不同处理方法。这些方法可按作用原理分为物理法、化学法、生化法。

物理法适用于分离悬浮于水的不溶物,包括沉淀法、过滤法、离心分离法、气浮法、蒸发结晶法、反渗透法等。涉及的单元装置为调节池、格栅、筛网、沉砂池、沉淀池、离心机、隔油池、滤池、磁分离器、气浮池等 (图 4)。其中,调节池用于调节废水水量及水质,格栅用于去除大体积固体,筛网相当于初次沉淀池的作用,沉砂池靠重力分离砂、煤渣等比重大的颗粒,沉淀池利用沉淀、离心机利用离心力去除悬浮固体,隔油池去除含油废水中可浮油,滤池进一步去除沉积物,磁分离器利用磁场分离磁性不同的物质,气浮池分离颗粒密度接近或小于水的细小颗粒。

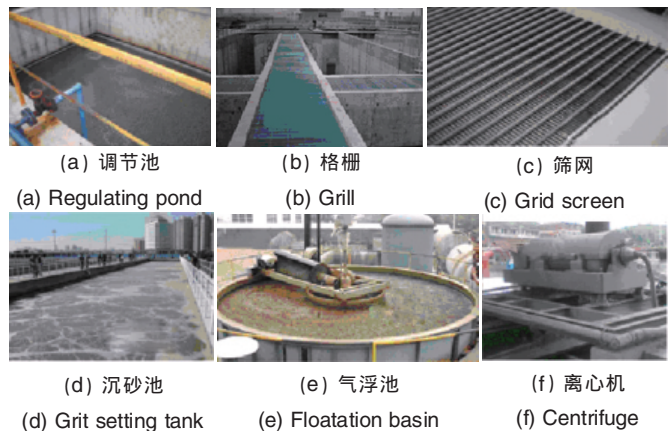


图 4 物理法处理污水单元装置

Fig. 4 Wastewater physical treatment unit

化学法一般涉及化学反应,或将污水中污染物分离回收,或使污染物变为无害,包括混凝法、中和法、化学沉淀法、氧化还原法、电渗析法。中和法是利用中和作用处理废水。氧化还原法是利用强氧化剂氧化分解废水中污染物变为易于从水中分离出来的物质。化学法涉及的单元装置为中和池、氧化还原池等。

生化法是通过微生物的新陈代谢作用,将废水中有机物的一部分转化为微生物的细胞物质,另一部分转化为比较稳定的化学物质,包括活性污泥法、生物膜法、厌氧生物处理法等,涉及的核心单元装置主要为曝气系统。

生活污水中污染物浓度低,易处理,而工业废水污染物成分复杂,单采用一种处理方法难以完全净化,需要多种方法结合才能达到处理要求,一般是遵循先易后难、先简后繁原则。首先采用物理法去除大块垃圾和漂浮物质,称为一级处理;然后利用化学或生化法去除悬浮固体、胶体及溶解性物质,称为二级处理;若不需要三级处理,则此时水体可直接排放或灌溉农田。例如常见的 A<sup>2</sup>/O (Anaerobic-Anoxic-Oxic) 法处理工业废水,工艺流程如图 5 所示,对于通过排水系统来的污水,先利用物理法,采用格栅去除大体积杂质,再利用生化法进行处理。

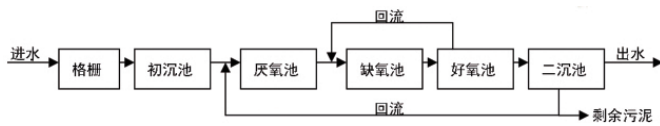


图 5 A<sup>2</sup>/O 法污水处理工艺流程

Fig. 5 Process flow diagram of A<sup>2</sup>/O

### 3 国内污水处理电耗分析和节能途径

#### 3.1 国内污水处理电耗分析

随着污水排放量的增加和排放标准的提高,污水处理的巨大耗电量引起了全球重视。据美国用电统计,城镇污水处理厂的总耗电量占美国总电负荷的 3%,随着人口增长和污染物去除标准的不断提高,未来 15 年内用于污水处理的总用电量还将继续增加 20% 以上<sup>[3]</sup>。而中国也存在类似的耗电问题,图 6 是中国历年耗电量,图 7 是中国历年污水处理耗电量,可见中国用于污水处理的电耗逐年递增。但污水处理耗电量占总耗电量比值,却由 2000 年的 2% 下降至 2007 年的 1%,这并非因为中国污水处理工艺更节能,恰恰相反说明中国污水处理力度不够。

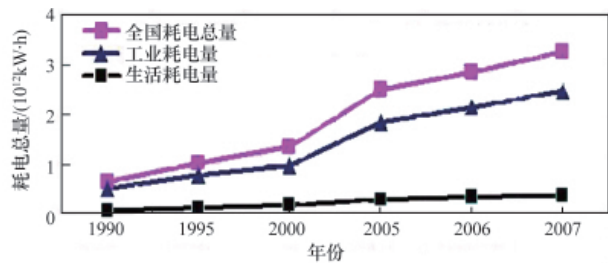


图 6 中国历年耗电量

Fig. 6 Power consumption in China

对于污水处理系统,耗电指标是“吨水耗电量”。不同地区、不同处理方法、不同进水水质和出水要求,吨水耗电量相差较大。即使相同地区采用相同方法,天处理量不同,吨水耗电量也不同,处理厂天处理量越大,吨水耗电量越小。笔者分析了文献中不同处理工艺的吨水耗电值<sup>[4-11]</sup>,如图 8 所示,处

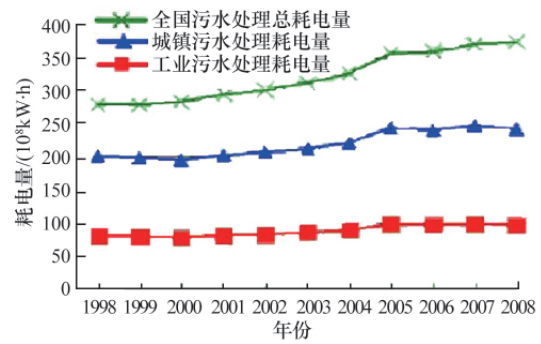


图 7 中国历年污水处理耗电量

Fig. 7 Power consumption of wastewater treatment in China

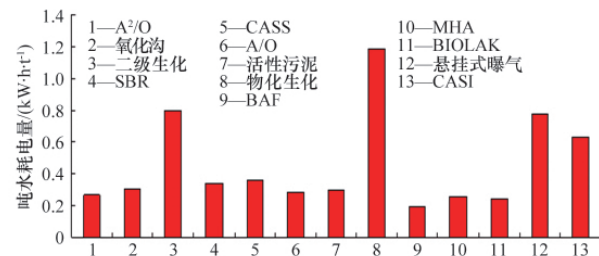


图 8 不同处理方法吨水耗电量

Fig. 8 Power consumption of per ton water of different wastewater treatment methods

理程度越高,吨水耗电量越大。

对于不同行业产生的污水,污染物成分与浓度不同,吨水耗电量也不同。笔者对部分行业污水和部分处理方法吨水耗电量进行统计,如图 9 所示,通过比较可以看到,电镀行业污水明显比其他行业污水的吨水电耗大。这主要因为电镀废水含有高毒性的重金属离子,如镀件漂洗水、废槽液等,其水质较差,成分复杂,含多种污染物,处理难度和成本较高。

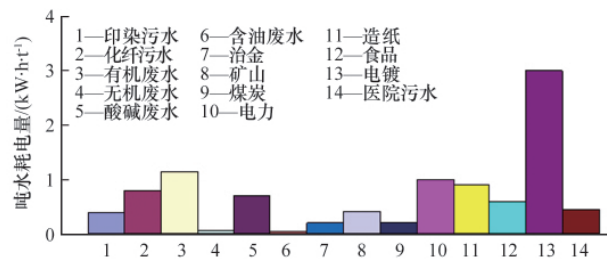


图 9 不同行业污水吨水耗电量

Fig. 9 Power consumption of per ton water of different industries

每种处理方法、工艺流程都存在耗电较大的单元。A<sup>2</sup>/O、氧化沟和 SBR (序列间歇式活性污泥法) 是中国采用的典型污水处理工艺,在数量和处理能力方面约占全国的 80%。表 1 为中国典型二级污水处理厂电耗单元分布<sup>[12]</sup>,污水处理电耗主要用于提升污水的进水泵,生物处理的曝气池供氧,以及污泥处理三个工艺过程,占了近 70%。

#### 3.2 节能途径

一般污水处理厂设计时会预留一定容量,便于以后改造

表 1 中国典型二级污水处理厂电耗单元分布  
Table 1 Power consumption unit in wastewater treatment plant (secondary treatment)

单元过程	所占比例/%
污水提升	10~20
污水生物处理	50~70
污泥处理	10~25
合计	70

扩建或应对特殊情况,但是过大的裕度会使处理系统长期处于低负荷运行,从而造成能源的低利用率。住房和城乡建设部 2004 年统计,全国城市污水处理厂运行负荷率不到 65%<sup>[13]</sup>。对于“大马拉小车”造成的能源浪费问题,解决方案是合理设计处理厂,充分调查和合理预测服务范围内的污水量变化,并根据实际情况调节处理单元的在线数。如在旱季时,由于污水量减少,可通过分析,停止一定数量的生物反应器。通过调节处理单元的在线数,提高能源利用率。

针对传统污水处理方法耗电量大的问题,有以下几个节能途径。

1) 改进传统污水处理方法中的工艺单元,减少耗能。

通过对传统污水处理方法的耗电分析,针对耗电较大的工艺单元进行改进,减少总耗电量。如表 1,改进耗电量较大的进水泵和曝气系统两个工艺单元。对于进水泵,可根据设计降低泵扬程,同时尽量使泵在高效区间进行,调节水位控制器以减少水泵启闭次数,使用变频高效电机和传动装置,对于地形高低起伏较大的山区,可通过优化布局设置,充分利用自然地形实现工艺流程重力流,节约能耗。曝气系统的节能,最根本的措施是减小风量,而减小风量必须提高扩散装置效率。通过改变曝气方式提高充氧效率,控制溶解氧(DO)值防止过度曝气,例如天津纪庄子和东郊污水处理厂,采用微孔曝气比穿孔管节能 20% 以上,北京亦庄开发区污水处理厂采用三阶段 DO 控制,比采用时间、气水比控制方式节能 10%<sup>[13]</sup>。

2) 改进工艺流程,减少耗能。

例如图 10 为四段进水多级 A/O 工艺流程,与图 5 传统的 A<sup>2</sup>O 相比,没有混合液回流。回流泵在泵耗电中占 1/3,因此没有回流,可节省能源且降低成本<sup>[13]</sup>。

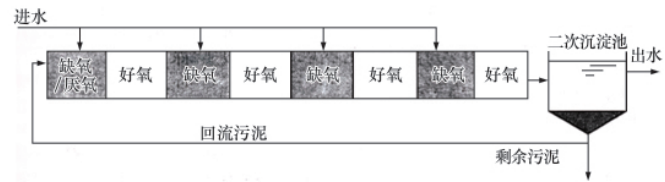


图 10 四段进水多级 A/O 工艺流程  
Fig. 10 Process flow diagram of 4-step-feed multistage A/O

3) 开发处理污水新技术、新方法,减少耗能。

开发推广能耗小的污水处理新技术和新方法,例如人工湿地法<sup>[14]</sup>、超导磁分离法<sup>[15-16]</sup>。人工湿地法,是将污水有控制地投到经常处于水饱和状态并生长有芦苇、香蒲等水生植物的土地上,污水在沿一定方向的流动过程中经耐水植物和土壤联合作用而得到净化,如图 11。人工湿地处理法优点是低成本、低能耗(表 2),但占地面积大、受季节影响严重,目前在中国工艺设计仍处于经验阶段。

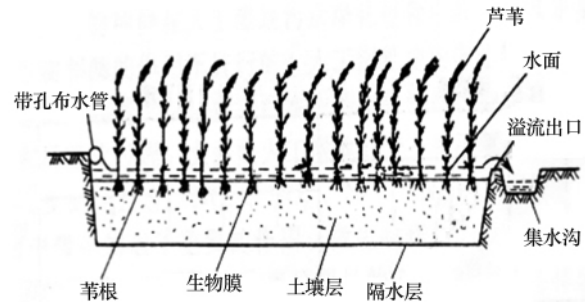


图 11 人工湿地污水处理示意图  
Fig. 11 Schematic diagram of constructed wetland wastewater treatment

超导磁分离技术是一种新型的污水处理技术,预先在污水中加入磁种,使本身无磁性的有害物质通过氢键、范德瓦尔斯力与经表面改性的磁种结合凝聚成磁性絮团,在强磁场下,磁性絮团被吸附到钢毛或筛网上,通过钢毛或筛网的移动达到连续净化污水的目的,如图 12。

超导磁分离技术与传统污水处理方法相比具有占地面积小、处理效率高、节能等优点。与以往的普通电磁体、永磁体相比可获得更高的磁场场强。普通电磁体提供的磁场场强

表 2 人工湿地法与其他方法的耗电量比较

Table 2 Comparison of power consumption between constructed wetland and other wastewater treatments

项目	处理方式	总投资 /万元	吨水投资 /(元·t <sup>-1</sup> )	年运行费用 /万元	吨水处理成本 /(元·t <sup>-1</sup> )	年耗电 /(万 kW·h)	吨水耗电 /(kW·h·t <sup>-1</sup> )	吨水用地 /(m <sup>2</sup> ·t <sup>-1</sup> )
深圳某水质净化厂	鼓风曝气	3300	660	>100	>0.2	319	0.175	2.0
珠海某水质净化厂	鼓风曝气	1500	883	>100	>0.2	420	0.64	1.0
海南某水质净化厂	氧化沟	574	574	36.5	0.2	102.4	0.28	1.2
白泥坑人工湿地处理系统	人工湿地	4.89	138	2	0.02	0	0	2.7

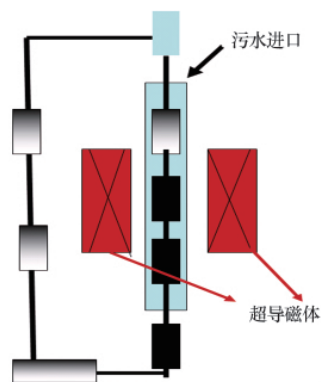


图 12 超导磁分离污水处理示意图

Fig. 12 Schematic diagram of superconducting magnetic separation wastewater treatment

在 1T 左右,且耗电量大,为兆瓦级。永久磁体最大场强为 0.5T,磁分离效果不明显。采用超导材料绕制的超导磁体可获得 3T 甚至更高的磁场场强,由于超导体在临界温度以下无电阻,因此,运行时耗电极低,同样在 1T 下,耗电量为千瓦级(包括提供低温的制冷机消耗功率)。因此,超导磁分离处理污水技术,被认为是继超导磁体在医用核磁谱仪、矿物磁性杂质分离领域应用后又一有希望工业应用的新技术。目前日本、韩国、美国都在加快发展这项技术,在中国污水处理方面也应该得到重视。

#### 4 结语

采用传统的污水处理工艺,污水处理厂的运行成本过高,导致偷排现象不止。主要原因是运行中能耗较高,使得建成的污水处理设备无法正常运转,未发挥作用。通过能耗分析,污水处理厂设计中可采取的节能措施如下:①分析本地区的污水进水量及成分,选择合理高效的处理工艺;②改进工艺单元,选用高效设备;③合理采用节能新技术、新方法。

通过以上 3 方面的改进,可达到高效低耗,不仅给企业创造更多效益外,更减轻了国家污水处理负担,对中国的经济和社会发展都具有重要意义。

#### 参考文献 (References)

- [1] 中国环境保护部. 2008 中国环境统计年报[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Annual statistic report on environment in China 2008[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010.
- [2] 胡振鹏. 水资源环境工程[M]. 南昌: 江西高校出版社, 2003.  
Hu Zhenpeng. Water resources and environmental engineering [M]. Nanchang: Jiangxi University Press, 2003.
- [3] Carns K. Bring energy efficiency to the water & wastewater industry: How do we get there?[C]//Proceedings of the Water Environment Federation. WEFTEC, 2005.
- [4] 杨凌波, 曾思育, 鞠宇平. 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 Lingbo, Zeng Siyu, Ju Yuping. *Water & Wastewater Engineering*,

- 2008, 34(10): 42-45.
- [5] 李怀志. 明胶生产废水的二级生化处理[J]. 明胶科学与技术, 1999, 19(4): 196-197.  
Li Huaizhi. *The Science and Technology of Gelatin*, 1999, 19(4): 196-197.
- [6] 梅凯, 吴慧芳. CASS 法工艺在某高校生活污水处理中的应用[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2005, 27(1): 71-75.  
Mei Kai, Wu Hui Fang. *Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition*, 2005, 27(1): 71-75.
- [7] 王琦, 刘创喜, 刘阳. 城市污水处理厂能耗优化的数学模型建立[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2009, 26(4): 74-77.  
Wang Qi, Liu Chuangxi, Liu Yang. *Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering*, 2009, 26(4): 74-77.
- [8] 罗慧中, 黄志树. MHA 工艺在城市污水处理工程中的应用 [J]. 中国环保产业, 2008(3): 48-50.  
Luo Huizhong, Huang Zhishu. *China Environmental Protection Industry*, 2008(3): 48-50.
- [9] 孙力平. 适合于小城镇的污水处理工艺—百乐克(BIOLAK)污水处理工艺介绍 [C]//中小城镇市政污水处理工程技术工艺高级研讨会论文集. 成都, 2005.  
Sun Liping. Introduction of BIOLAK—a wastewater treatment process for small towns[C]//Proceedings of Advanced Seminar of Urban Sewage Treatment Technology for Medium and Small Towns. Chengdu, 2005.
- [10] 黄忠思. 悬挂链移动曝气工艺在污水处理厂中的应用 [J]. 中国环保产业, 2008(6): 60-62.  
Huang Zhongsi. *China Environmental Protection Industry*, 2008(6): 60-62.
- [11] 王本辉, 傅金祥, 李彤岩. CAST 工艺在阜新啤酒厂生产废水处理中的应用[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 2003, 19(4): 312-315.  
Wang Benhui, Fu Jinxiang, Li Tongyan. *Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering University*, 2003, 19(4): 312-315.
- [12] 李永. 污水处理厂能耗分析与控制[J]. 环境科技, 2008, 21(5): 54-56.  
Li Yong. *Environmental Science and Technology*, 2008, 21(5): 54-56.
- [13] 徐强. 污水处理节能减排新技术、新工艺、新设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.  
Xu Qiang. New technique, process and equipment of sewage treatment for energy-saving and emission-reduction[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [14] 白晓慧, 王宝贞, 余敏. 人工湿地污水处理技术及其发展应用 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(6): 88-92.  
Bai Xiaohui, Wang Baozhen, Yu Min. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 1999, 32(6): 88-92.
- [15] 籍国东, 李顺. 人工湿地及其在工业废水处理中的应用[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 224-228.  
Ji Guodong, Li Shun. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2): 224-228.
- [16] 陈显利, 焦雨红, 张浩, 等. 超导磁分离在造纸厂污水净化中的应用 [J]. 科技导报, 2009, 27(3): 61-66.  
Chen Xianli, Jiao Yuhong, Zhang Hao, et al. *Science & Technology Review*, 2009, 27(3): 61-66.
- [17] 张浩, 黄荣进, 蔡方硕, 等. 超导磁分离污水处理系统中纳米磁种子材料的制备和表征[C]//第八届全国低温工程大会暨中国航天低温专业信息网 2007 年度学术交流会论文集. 北京, 2007.  
Zhang Hao, Huang Rongjin, Cai Fangshuo, et al. Preparation and characterization of nano magnetic particles in superconducting magnetic separation system[C]//Proceeding of 8th National Cryogenic Engineering Conference & 2007 Seminar of China Astronautics Cryogenic Engineering Information Network. Beijing, 2007.

(责任编辑 吴晓丽)