

# 简化活性污泥数学模型在城市污水厂中的应用<sup>\*</sup>

刘 芳 陈秀华

顾国维

(东华大学环境科学与工程学院,上海 200051) (同济大学环境科学与工程学院,上海 200092)

**摘要** 以活性污泥 1 号模型(ASMI)为开发平台,建立了简化的活性污泥数学模型(ASM-CN)。该模型主要描述了碳氧化和硝化过程,其中模型组分、反应过程和参数的数量都少于 ASMI,从而提高了该模型在城市污水厂中的实用性。通过测定模型组分、化学计量系数和动力学参数,为模型的应用提供了重要的前提和基础。最后利用 ASM-CN 模型对实际城市污水厂的运行进行了动态模拟,模拟结果良好,验证了 ASM-CN 模型的实用性和有效性,并且也验证了模拟程序的准确性。

**关键词** 活性污泥数学模型 简化 城市污水厂 模拟

## 1 引言

活性污泥 1 号模型(ASMI)自从 1987 年推出以来,一直受到广泛关注,是影响最广、应用最多的活性污泥数学模型之一。但该模型在实际应用中也存在一些问题,如反应过程复杂、参数众多等,这在一定程度上限制了该模型的推广使用。为了方便地将该模型应用到实际污水厂的设计运行中,故以 ASMI 为研究平台,在此基础上进行合理的简化,建立了简化的活性污泥数学模型(ASM-CN)。然后利用 Matlab 语言编制了模拟程序,并通过合理的路线对污水厂的实际运行进行了模拟。

## 2 简化活性污泥数学模型的建立

### 2.1 模型建立的依据

ASM-CN 模型是在 ASMI 的基础上进行合理的简化而建立的,其简化依据主要有以下几方面:

(1)大部分城市污水厂都采用传统活性污泥法,不包括缺氧池,因此为了更广泛、灵活的使用活性污泥数学模型,在 ASM-CN 模型中只考虑了碳氧化和硝化过程,不考虑反硝化过程,即不考虑异养菌的缺氧生长反应。

(2)由于氨化动力学参数不易量化,而且这一过程很快,几乎不影响模型的预测<sup>[1]</sup>。此外,氨化反应是在异养型微生物分解含氮的溶解性有机物时进行的,氨化速率可能与溶解性基质的去除速率成比例<sup>[2]</sup>,所以在 ASM-CN 模型中忽略了氨化反应,假设微生物的衰减可形成氨氮。

<sup>\*</sup>国家自然科学基金重点项目(50138010);上海市 2001~2003 年度重点学科建设资助项目。

(3)颗粒性有机氮的水解过程是伴随着颗粒性有机物的水解过程进行的,所以不考虑颗粒性有机氮的水解过程,同时取消颗粒性有机氮和溶解性有机氮两种组分。

(4)在通常的活性污泥系统中,进水中慢速生物降解有机物与活性微生物的相对浓度一般都处于较低的水平,慢速生物降解有机物的水解一般都受其自身浓度的控制<sup>[3]</sup>,所以采用一级反应方程表示水解过程。

(5)在生物系统中,代谢惰性颗粒有机物和进水中的惰性颗粒有机物具有相同的物理和生化性质,都不参与任何生化反应,以剩余污泥的形式排放,所以在 ASM-CN 模型中将两种组分合并成为惰性颗粒有机物,以  $X_1$  表示。

### 2.2 简化活性污泥数学模型的结构

根据上述依据,经过合理的简化后,ASM-CN 模型只包含 10 个组分和 5 个反应过程,表 1 给出了组分和反应过程的关系,并列出了相关的化学计量系数和反应速率表达式。

从表 1 对 ASM-CN 模型的描述中可以看出,无论是组分、反应过程还是化学计量系数、动力学参数,其数量都比 ASMI 少,这意味着可以减小模型参数测定的工作量和模拟中的计算量,从而提高了该模型在城市污水厂中的实用性。

## 3 模拟程序的建立

传统活性污泥法的工艺流程一般是由单级完全混合反应器(CSTR)和二沉池组成(见图 1)。

表 1 ASM-CN 模型反应过程和组分矩阵表

工艺过程 $j$	组分 $i$										工艺过程速率 $j$
	$S_I$	$S_S$	$X_I$	$X_S$	$X_{BH}$	$X_{B,A}$	$S_O$	$S_{NO}$	$S_{NH}$	$S_{AL,K}$	
异养菌的生长	—	$-\frac{1}{Y_H}$	—	—	1	—	$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$	—	$-i_{XB}$	$-\frac{i_{XB}}{14}$	$\mu_{mH} \left( \frac{S_S}{K_S + S_S} \right) X_{B,H}$
自养菌的生长	—	—	—	—	—	1	$-\frac{4.57-Y_A}{Y_A}$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{XB} - \frac{1}{Y_A}$	$\frac{i_{XB}}{14} - \frac{1}{7 Y_A}$	$\mu_{mA} \left( \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left( \frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A}$
异养菌的衰减	—	—	$f_I$	$1-f_I$	-1	—	—	—	$i_{XB}$	—	$b_H X_{B,H}$
自养菌的衰减	—	—	$f_I$	$1-f_I$	—	-1	—	—	$i_{XB}$	—	$b_A X_{B,A}$
水解	—	1	—	-1	—	—	—	—	—	—	$k_h X_S$

表 1 中  $S_I$  ——溶解惰性有机物 mg/L;

$S_S$  ——易生物降解有机物 mg/L;

$X_I$  ——颗粒惰性有机物 mg/L;

$X_S$  ——慢速可生物降解有机物 mg/L;

$X_{BH}$  ——异养菌 mg/L;

$X_{BA}$  ——自养菌 mg/L;

$S_O$  ——溶解氧 mg/L;

$S_{NO}$  ——硝态氮 + 亚硝态氮 mg/L;

$S_{NH}$  ——氨氮 mg/L;

$S_{AL,K}$  ——碱度 mmol/L;

$Y_H$  ——异养菌生长速率;

$f_I$  ——颗粒性衰减产物的比例;

$i_{XB}$  ——N 在生物量 COD 中的比例;

$Y_A$  ——自养菌生长速率;

$b_A$  ——自养菌衰减速率  $d^{-1}$ ;

$k_h$  ——水解速率常数  $d^{-1}$ ;

$j$  ——工艺过程速率;

$\mu_{mA}$  ——自养菌最大比生长速率  $d^{-1}$ ;

$K_{NH}$  ——氨氮的半饱和系数  $gN/m^3$ ;

$K_{O,A}$  ——自养菌氧的半饱和系数  $gCOD/m^3$ ;

$\mu_{mH}$  ——异养菌最大比生长速率  $d^{-1}$ ;

$K_S$  ——基质的半饱和系数;

$b_H$  ——异养菌衰减速率  $d^{-1}$ 。

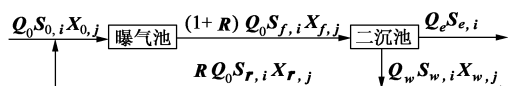


图 1 模拟流程

图中  $Q_0$  ——进水流量  $m^3/d$ ;

$Q_e$  ——出水流量  $m^3/d$ ;

$Q_w$  ——剩余污泥排放量  $m^3/d$ ;

$R$  ——回流比;

$X_{w,j}$  ——颗粒性  $j$  组分在剩余污泥中的浓度 mg/L;

$S_{w,i}$  ——溶解性  $i$  组分在剩余污泥中的浓度 mg/L;

$S_{r,i}$  ——溶解性  $i$  组分在回流污泥中的浓度 mg/L;

$X_{r,j}$  ——颗粒性  $j$  组分在回流污泥中的浓度 mg/L。

根据数学模型的建模原则(即单位时间单位体积系统内组分的变化量,等于进入该系统的组分总量,减去离开该系统的组分总量,加上该组分的反应总量),完全混合反应器内溶解性  $i$  组分和颗粒性  $j$  组分的物料平衡方程为:

$$\frac{dS_{0,i}}{dt} = [S_{0,i} - S_{f,i}]dh + s_i \quad (1)$$

$$\frac{dX_{0,j}}{dt} = X_{0,j}dh - X_{f,j}dx + x_j \quad (2)$$

式中  $S_{0,i}$  ——溶解性  $i$  组分的进水浓度  $g/m^3$ ;

$S_{f,i}$  ——溶解性  $i$  组分的出水浓度  $g/m^3$ ;

$X_{0,j}$  ——颗粒性  $j$  组分的进水浓度  $g/m^3$ ;

$X_{f,j}$  ——颗粒性  $j$  组分的出水浓度  $g/m^3$ ;

$x_j$  ——颗粒性  $j$  组分的反应速率;

$s_i$  ——溶解性  $i$  组分的反应速率;

$dh$  ——水力稀释率;

$dx$  ——颗粒性物质稀释率。

利用公式(1)和公式(2)就可列出曝气池中 10 个状态变量的物料平衡方程,组成一个 10 阶的微分方程组。本文采用 Matlab 语言编制程序对这个 10 阶的微分方程组进行求解。

#### 4 简化活性污泥数学模型的应用

##### 4.1 城市污水厂概况

上海某城市污水厂处理的污水主要是周围居民区的生活污水及少量工业废水,实际处理流量为  $55\ 000\ m^3/d$  左右。进水  $COD_G$  约为  $300\ mg/L$ , SS 约为  $100\ mg/L$ , TN 约为  $45\ mg/L$ ,  $NH_3-N$  约为  $30\ mg/L$ , pH

约为 7.5。该污水厂采用活性污泥法二级处理工艺(主要工艺流程见图 2),曝气池有 2 个,每个分为 4 个廊道,每个廊道为 45 m × 6 m × 6 m,曝气池 BOD<sub>5</sub> 污泥负荷为 0.3 kg/kg d,水力停留时间约 5.6 h;辐流式沉淀池 4 个,直径 30 m,水深 6.1 m(进水口深 2.3 m),表面负荷为 1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · h,水力停留时间约 2.5 h,污泥回流比为 60%,回流污泥含水率为 98%,污泥平均停留时间为 8 d 左右。

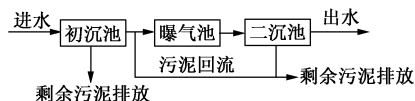


图 2 污水厂主要工艺流程

## 4.2 模型组分的确定

该污水厂多年来的监测数据皆为常规分析项目,对进水特性的描述仍然是以 COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub> 和 SS 为主,没有与 ASM<sub>1</sub>-CN 模拟程序相对应的模型组分划分。因此,合适的数据转换设计将成为决定 ASM<sub>1</sub>-CN 模拟程序在该污水厂模拟成败的关键因素。文献中提供了多种进水常规监测数据与模型组分的转换方法<sup>[2~4]</sup>,但笔者认为不同地区不同时段的水质特性差异很大,文献推荐的转换方法不一定适合上海地区的生活污水水质,因此在对上海城市污水厂的运行进行模拟时一定要结合该厂的水质特性分析。

在此分别利用呼吸计量法和物化法对该污水厂的曝气沉砂池出水、初沉池出水和二沉池出水的水质特性进行了详细分析<sup>[5]</sup>,确定了曝气沉砂池出水和初沉池出水中各有机组分占总 COD<sub>Cr</sub> 的比例(见表 2)。针对表 2 列出的曝气沉砂池出水中各组分占总 COD<sub>Cr</sub> 的比例对污水厂的进水进行划分,得出各组分的浓度后再进行模拟。

表 2 主要有机组分占总 COD<sub>Cr</sub> 比例

组分	曝气沉砂池出水中 占总 COD <sub>Cr</sub> 比例 %	初沉池出水中 占总 COD <sub>Cr</sub> 比例 %
S <sub>1</sub>	5.52	11.38
S <sub>S</sub>	22.06	13.57
X <sub>I</sub>	31.03	39.61
X <sub>S</sub>	33.66	25.53
X <sub>BH</sub>	7.44	8.80

## 4.3 模型参数的确定

通过对该污水厂的灵敏度分析可知<sup>[5]</sup>, Y<sub>H</sub>、μ<sub>mH</sub>、b<sub>H</sub>、μ<sub>mA</sub>、b<sub>A</sub> 对曝气池中的有机组分、出水指标浓度都有比较显著的影响,这说明微生物在处理过程中处于

核心地位,对所有反应过程都有直接影响,因此对这几个参数的准确测定也非常重要。但由于目前很难用现有的方法测定 b<sub>A</sub>,文献<sup>[1]</sup>对其范围进行了报道,所以在模拟污水厂的运行时直接采用该参数的推荐值,而对其它几个参数进行了实际测定。根据实际测定结果<sup>[5]</sup>,针对该污水厂, Y<sub>H</sub> 为 0.71, μ<sub>mH</sub> 为 5.70 d<sup>-1</sup>, b<sub>H</sub> 为 0.48 d<sup>-1</sup>, μ<sub>mA</sub> 为 0.45 d<sup>-1</sup>。其余 8 个参数先采用国际水质协会推荐的默认值(20),在参数校核过程中进行适当调整。

由动力学参数的测定研究可知<sup>[5]</sup>,温度(尤其是水温)对于反应速率有着非常重要的影响,因此也会引起 ASM<sub>1</sub>-CN 模拟程序中的模型参数值的变动。对污水厂的 2002 年 4、5、6 月的常规监测数据分析后发现,该厂这 3 个月的水温在 13~20 内变化,因而在模拟污水厂的运行时必须把温度对参数的影响考虑在内,故采用 Arrhenius 公式对模型参数进行修正。采用的温度修正因子如表 3 所示,修正后的参数值见表 4。

表 3 温度修正因子<sup>[2]</sup>

参数	参数
Y <sub>H</sub> 和 K <sub>S</sub> 、Y <sub>A</sub>	μ <sub>mA</sub>
F <sub>I</sub> 和 i <sub>NB</sub>	K <sub>OA</sub>
b <sub>H</sub> 和 b <sub>A</sub>	K <sub>NH</sub>
μ <sub>mH</sub>	k <sub>h</sub>

表 4 模拟程序的参数取值

参数	4 月(13)	5 月(14)	6 月(20)
Y <sub>H</sub>	0.71	0.71	0.71
Y <sub>A</sub>	0.24	0.24	0.24
F <sub>I</sub>	0.07	0.07	0.07
i <sub>NB</sub>	0.086	0.086	0.086
μ <sub>mH</sub>	3.12	3.40	5.70
b <sub>H</sub>	0.25	0.27	0.48
K <sub>S</sub>	20.0	20.0	20.0
μ <sub>mA</sub>	0.22	0.24	0.449
b <sub>A</sub>	0.05	0.06	0.10
K <sub>NH</sub>	0.40	0.46	1.0
K <sub>OA</sub>	0.6	0.6	0.6
k <sub>h</sub>	66.5	70.5	100

## 4.4 污水厂运行的模拟分析

采用表 2 中的比例对进水 COD<sub>Cr</sub> 进行组分划分,动力学参数和化学计量系数采用表 4 中的数值,分别

利用 EFOR 商务软件和 ASM-CN 模拟程序对污水厂 2002 年 4、5、6 月的变化数据进行了模拟分析,获得了这 3 个月的出水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  浓度、SS 浓度、 $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度和  $\text{NO}_x\text{-N}$  浓度的变化趋势,并与实际出水的各指标浓度进行比较,图 3~图 4 表示了 6 月份各出水指标浓度的变化趋势。

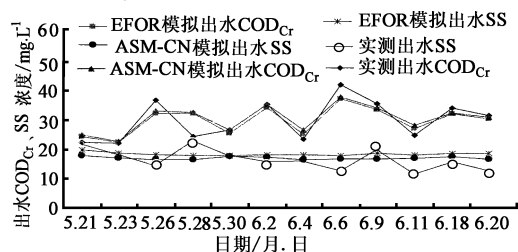


图 3 出水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、SS 浓度变化曲线

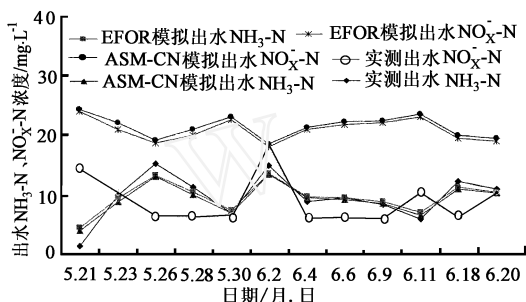


图 4 出水  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_x\text{-N}$  浓度变化曲线

在模型参数一定的条件下,模拟结果只与进水条件有关,因此 EFOR 软件和 ASM-CN 程序模拟的出水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、SS 及  $\text{NH}_3\text{-N}$  变化趋势与进水相应指标的变化趋势相近,而实测出水指标浓度受外界环境影响较大,相应的变化幅度较大,与模拟结果相比有几个点的误差比较大,但总体来说,出水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、SS 及  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度的模拟效果较好,模拟误差控制在 11% 以内。相反,  $\text{NO}_x\text{-N}$  浓度模拟误差很大,尤其是 6 月份的模拟误差达到 132.50% 和 138.25%,其原因可能是因为污水厂曝气池内溶解氧浓度较低,生物反应系统可能发生了同时硝化反硝化作用,部分  $\text{NO}_x\text{-N}$  转化为  $\text{N}_2$  的形式排出系统,导致最终二沉池出水的实测  $\text{NO}_x\text{-N}$  浓度较低,而在 ASM1 和 ASM-CN 模型中没有描述同时硝化反硝化作用,所以模拟的二沉池出水  $\text{NO}_x\text{-N}$  浓度大于其实测浓度。此外,从模拟结果还可以看出,EFOR 模拟结果与 ASM-CN 模拟结果比较接近,这就进一步验证了 ASM-CN 模型的实用性和有效性,

并且也验证了模拟程序的准确性。

## 5 结论

通过合理简化建立的活性污泥数学模型 (ASM-CN) 无论组分、反应过程还是模型参数,其数量都比 ASM1 少,这意味着可以减小模型组分和参数测定的工作量和模拟中的计算量,从而提高了该模型在城市污水厂中的实用性。对实际城市污水厂的模拟结果表明,ASM-CN 程序模拟的出水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、SS 及  $\text{NH}_3\text{-N}$  变化趋势与进水相应指标的变化趋势相似,而实测出水指标浓度受外界环境影响较大,相应的变化幅度较大,与模拟结果相比有几个点的误差比较大,但总体来说,出水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、SS 及  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度的模拟效果较好,模拟误差控制在 11% 以内。从模拟结果可以看出,EFOR 模拟结果与 ASM-CN 模拟结果比较接近,这就进一步验证了建立的活性污泥系统模型的实用性和有效性,并且也验证了模拟程序的准确性。

ASM-CN 模型可以通过模拟来反映模型参数和运行方式的改变对废水处理系统性能的影响,在对出水水质变化和各处理构筑物运行条件的变化进行详细分析后,可以制订出污水处理厂的优化运行方案,从而可以在提高出水水质、降低能耗等方面进行改进,因此该模型具有较高的实用价值。

## 参考文献

- 1 张亚雷,李咏梅译. 活性污泥数学模型,上海:同济大学出版社,2002.
- 2 张锡辉,刘勇弟译. 废水生物处理(第二版),北京:化学工业出版社,2003.
- 3 Sollfrank U., et al., Temperature effects on wastewater characterization and the release of soluble inert organic material Wat. Sci. Tech., 1992. 25 (6), 33.
- 4 Roelleveld R. J., et al., Experience with guidelines for wastewater characterization in the Netherlands, Wat. Sci. Tech., 2002. 45 (6).
- 5 刘芳. 城市污水厂活性污泥数学模型的参数测定及模拟研究,博士学位论文,上海:同济大学,2004.

作者通讯处 刘芳 200051 上海市延安西路 东华大学环境科学与工程学院

电话 (021) 62378442

E-mail 1976lf@dhu.edu.cn

2004 - 07 - 06 收稿

## APPLIATION OF UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BED-CONTACT OXIDATION PROCESS IN TREATMENT OF ETHANOL WASTEWATER ..... Fan Xinsheng *et al* (21)

**Abstract** The application of UASB contact oxidation process in treating ethanol wastewater is presented. The operating results have shown that when the influent  $\text{COD}_\text{Cr}$ ,  $\text{BOD}_5$  and SS are in range of 18 000 ~ 21 000 mg/L, 10 500 ~ 12 000 mg/L and 16 000 ~ 18 500 mg/L respectively, the effluent of the system is good enough to meet the class guided by National Wastewater Integrated Discharge Standard (GB8978-96).

**Keywords** ethanol wastewater, UASB reactor and contact oxidation

## STUDY ON TREATMENT OF PHOSPHORIC COATING WASTEWATER ..... Wu Juzhen *et al* (23)

**Abstract** The defatted wastewater was pretreated by heating or demulsified by acidification; then the phosphorized wastewater was experienced advanced treatment by coagulation-flocculation-sedimentation-airfloat process. The combination of suitable chemicals, inorganic coagulant and high polymer flocculant can reduced remarkably the contents of  $\text{COD}_\text{Cr}$ , oil and SS of the wastewater. The tests show that the process can reduce  $\text{COD}_\text{Cr}$  from 900 ~ 2 200 mg/L to below 50 mg/L, the oil content from 300 ~ 800 mg/L to below 5 mg/L and SS less than 45 mg/L. All the indexes meet the second-order of "National Wastewater Discharge Standard" (GB8978-1996).

**Keywords** flocculant, phosphorized wastewater, wastewater treatment, emulsified oil bearing wastewater and demulsification

## APPLICATION OF LKM TYPE FLOCCULANT IN TREATMENT OF OILY WASTEWATER ..... Song Yongji *et al* (26)

**Abstract** LKM type flocculant possesses of high anti-emulsification ability, good water solubility, good stability and usability. The cost of its multiple prescription LKM-5715 is low and its flocculation result is perfect. The insitu industrial experiments indicated that at similar deoiling efficiency, its consumption was 1/2 ~ 1/5 amount of poly-aluminum chloride. The production of scum was little and easy to dispose and utilize. Instead of poly-aluminum chloride, LKM-5715 type flocculant can be widely utilized in the treatment of oily wastewater.

**Keywords** wastewater treatment, flocculant and application study

## ENGINEERING EXAMPLE OF TREATING HOTEL SEWAGE BY $\text{A}^2/\text{O}$ PROCESS ..... Yu Xiuhua *et al* (28)

**Abstract** The designed treating capacity of a wastewater treatment plant for a hotel was 800  $\text{m}^3/\text{d}$ . The  $\text{A}^2/\text{O}$  process was used and the running results of two years showed that when  $\text{COD}_\text{Cr}$ ,  $\text{BOD}_5$ , SS,  $\text{NH}_3\text{-N}$  and animal & plant oil of the influent were 250 ~ 300 mg/L, 100 ~ 150 mg/L, 120 ~ 140 mg/L, 25 mg/L and 50 mg/L respectively, the quality of the effluent could meet the first order during second period of "Discharge Limits of Water Pollutants" (DB44/26-2001) in Guangdong Province.

**Keywords** hotel wastewater,  $\text{A}^2/\text{O}$  process and fully embedded structure

## OPERATION MANAGEMENT OF A-A/O PROCESS IN COKING WASTE WATER TREATMENT SYSTEM ..... Xing Xiangjun *et al* (29)

**Abstract** According to the actual circumstance of construction and operation of wastewater treatment project in Bei Gang Group Company, biological denitrogenation theory, A-A/O technological process, domestication sludge and operation management were discussed in this paper. The factors influencing the biological denitrogenation and nitrification were also explored.

**Keywords** coking waste water, nitrification-denitrification process and operation management

## APPLICATION OF SIMPLIFIED ACTIVATED SLUDGE MODEL TO URBAN WASTEWATER TREATMENT PLANT ..... Liu Fang *et al* (33)

**Abstract** Simplified activated sludge model (ASM-CN) is proposed based on the activated sludge model No. 1 (ASM1). This model describes the carbon oxidation process and nitrification process. The amount of components, processes and parameters of ASM-CN is fewer than that of ASM1, so the practicability of ASM-CN model is enhanced. The measurement of components and parameters is also studied. Finally, ASM-CN model is applied to simulate the operation of actual wastewater treatment plants and good results are achieved.

**Keywords** activated sludge model, simplification, urban wastewater treatment plant and simulation

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON PROCESS OF AIR OXIDATION AND ABSORPTION OF $\text{NO}_\text{x}$ WITH ALKALINE SOLUTION ..... Qiao Junshi *et al* (37)

**Abstract** According to the characteristics of current technology of disposing  $\text{NO}_\text{x}$  in waste gas in China, the possibility of the process of air oxidation of NO and absorption of  $\text{NO}_\text{x}$  waste gas with sodium hydroxide solution is analyzed. For the simulated waste gas in this process, the relation of  $\text{NO}_\text{x}$  concentration, oxidation time, ratio of oxidation and  $\text{NO}_\text{x}$  absorptivity was studied and analyzed, which provides an experimental basis for its industrial application.