生物处理含氯代脂肪烃废水的研究进展

傅旭庆 吕德伟 汪叔雄

(联合化学反应工程研究所浙江大学分所,杭州 310027)

摘要 从降解菌种及涉及的酶体系、降解过程机理、降解动力学和所用反应器等 4 方面对氯代脂肪烃的生物降解的研究作了综述。文献表明:通过驯化,某些菌种能在特定条件下降解氯代脂肪族物质。还介绍了降解菌种的特征,降解的可能途径和动力学模型,并比较了各种氯代脂肪族组分的可生物降解性。同时对降解所用的反应器进行了评价。

关键词 生物降解,氯代脂肪烃,废水生物处理。

氯代脂肪烃(如二氯甲烷、三氯乙烯、四氯乙烯等)具有疏水性、低水溶性、相对的化学稳定性和在空气中不易燃烧的特点,因而在干洗和半导体制造等工业中被普遍用作清洗溶剂;同时,在聚氯乙烯(PVC)的合成及环氧氯丙烷的生产过程中,氯乙烯、二氯乙烷及1,3-二氯丙醇等氯代脂肪烃作为原料或中间产物而广泛存在。由于氯代脂肪烃类物质大部分是很毒的,并且有些是可疑的致癌物(如氯乙烯、三氯乙烯、环氧氯丙烷、1,2-二氯乙烷等),因而治理含氯代脂肪烃废水引起了各国普遍重视[1]。

对于这类污染物,最初一般采用物理化学方法(如汽提、萃取、土埋、活性炭吸附、焚烧等)治理。这些方法都只是污染物的转移,不能从根本上治理,且容易造成二次污染、成本高。生物处理则能通过微生物作用将有毒物质转化为无毒物质,投资少且无二次污染,因而近年来成为各国研究的热点[2-26]。本文根据有关文献,从降解菌种及涉及的酶体系、降解过程机理、降解动力学和所用反应器等4个方面对氯代脂肪烃的生物降解作一综述。

1 降解氯代有机物的微生物及涉及的酶体系

由于自然界中的微生物通常最初不具备转 化人工合成的有毒物质的酶体系,因而氯代有机 物一般不易生物降解。只有在一定条件下,通过 富集培养,诱导出降解酶系的合成,驯化出所需 菌种。因而生物处理的关键是:(1)筛选专门降解菌种,(2)维持适宜的降解环境条件。各类氯代脂肪族物质的降解菌的研究情况如表1所示。

由表 1 可见,通过驯化假单胞菌属(Pseudomonas)、根瘤菌属(Rhicobium)、生丝微菌属(hyphomicrobium)、不动杆菌属(Acinetobacter)、分枝杆菌属(Mycobacterium)、亚硝化单胞菌属(Nitrosomonas)及甲基单胞菌属(Methylominas)中的某些菌种能在特定条件下降解氯代脂肪族物质。

2 生物降解过程机理

Voget^[1]认为在卤代脂肪烃的转化过程中, 非生物的和生物的转化体系都具有相似的反应 机制和转化产物。他将卤代脂肪烃的转化分为两 大类型: (1)需要外部电子转移体的氧化还原 反应。(2)不需外部电子转移体的取代和脱卤作 用。

表 2 列出了氯代脂肪物质降解的主要研究者,基质的降解过程。可参见有关文献。氯代烷烃的生物降解过程一般为:烷烃→醇氧化酸(或醛)→CO₂+H₂O。而对于氯代烯烃,在好氧条件下,一般先氧化为不稳定的氯代环氧化合物,然后再进一步降解。如三氯乙烯(TCE)通过甲烷营养菌株 46-I 的甲烷单氧酶作用,先形成三氯乙烯环氧化合物,然后在水溶液中进一步

¹⁹⁹³ 年 4 月 20 日收到修改稿

自发降解为二氯乙酸、甘油酸或一氧化碳、甲酸 等组分,最后转化为 CO2[17]。在厌氧条件下,氯代 表 1 氧代脂肪族物质降解菌椰况

基 质	降解菌种	酶系特征	主要研究者
1. 氯代脂肪酸:			
2,2′-二氯丙酸	假单胞菌(Pseudomonas Putida S3,P3)	脱卤酶活性	英国 Senior ^[2] 和 Slater ^[3]
(2,2'-DCPA)	根瘤菌属(Rhzobium)		美国 Berry[4]
2. 氯代脂肪醇:			
2-氯乙醇(2-CE)	假单胞菌株(Pseudomonas.sp)	脱卤酶活性	瑞士 Stucki ^[5]
3. 氯代烷烃:			
二氯甲烷(DCM)	(1)好氧菌 DM		瑞士 Brunner ^[6]
	(2)生丝微菌属(hyphomicrobium)	脱卤酶为谷胱	瑞士 Stucki ^[7] 和
	(3)兼性甲基营养菌		
	(facultatire methylotrophic bacterium)	甘肽诱导酶	Leisinger ^[8]
4. 氯代烯烃			
氯乙烯(VC)	分枝杆菌(Mycobacterium aurum L ₁)	烯烃单氧酶	荷兰 Hartmans[9]
反-1,2-二氯乙烯	(1)甲基单胞甲烷菌(Methylomonas methanica)	甲烷诱导酶	美国 Janssen[10]
(t-1,2-DCE)	(2)甲基球菌(Methylosinus sp.)	甲烷诱导酶	
三氯乙烯(TCE)	(1)不动杆菌属好氧杆菌 G4	苯或甲苯诱导	美国 Nelson[11]
	(Acinetobacter aerobic strain G ₄)		
	(2)甲苯诱导假单胞菌	甲苯双氧酶活性	美国 Wackett[12]
	(Pseudomonas Putida F_1)		
	(3)甲烷营养菌	溶解型甲烷单氧酶	荷兰 Oldenhuis ^[13]
	(Methanotrophic bacterium)		
	(4)分枝杆菌属丙烷氧化菌	广泛特导性氧化酶	美国 Wackett ^[14]
	(Mycobacterium Propane-oxidizing bacteria)		
	(5)亚硝化单胞菌属氨氧化菌 -	氨氧化酶	美国 Arciero[15]
	(Nutrosomonas europaca)	,	
四氯乙烯(PCE)	厌氧菌(anaerobic becterium)	还原脱氯作用	德国 KÄstner ^[16]

氯代脂肪族物质降解的主要研究者

基质	主要研究者
2,2'-二氯丙酸(2,2'-DCPA)	美国 Berry ^[4]
2-氯乙醇(2-CE)	瑞士 Stucki ^[5]
二氯甲烷(DCM)	瑞士 Brunner[6]
氯乙烯(VC)	荷兰 Hartmans[9]
反-1,2-二氯乙烯(t-1,2-DCE)	美国 Janssen[10]
三氯乙烯(TCE)	美国 little[17]
四氯乙烯(PCE)	德国 Milde[18]

烯烃(如四氯乙烯)则通过一系列还原脱卤作用, 形成烯烃,进而转化为甲烷[18]。因而,从各类氯 代脂肪烃类物质降解过程,可确认它们的可生物 降解性的大小顺序一般为:氯代脂肪酸>氯代脂 肪醇>氯代烷烃或氯代烯烃。同时,含氯有机物 较不含氯的同系物难降解;同系物中含氯原子多 的比氯原子少的难降解,分子大的比分子小的难 降解。此外,多氯代物(如四氯乙烯、氯仿等)一般 仅能在厌氧条件下进行还原脱氯。

降解动力学

美国 Folsom(1990 年)[19]研究了三氯乙烯和 苯酚通过 Pseudomonas cepacia G, 菌的降解动力学 和底物间的相互作用,测得三氯乙烯降解的表观 细胞动力学常数 K。及最大反应速率 V_{max}值分别 为 3μM 和 8nmol/min(mg 细胞量)-1。在短暂的 细菌生长延迟期后,菌株 P. cepacia G, 能够降解 浓度大于 300µM 的三氯乙烯。同时,还表明三氯 乙烯对苯酚的降解有明显的抑制作用,其大小可 用底物竞争抑制模型表示,即 1/0 = $\frac{V_{max}[S]}{[S]+K_s(1+\frac{[I]}{K_s})}$,式中,[S]:基质(苯酚)浓度,

[1]:抑制物(三氯乙烯)浓度,1/0:比基质降解速

率, V_{max} 最大比基质降解速率, K_s :米氏常数, K_l : 抑制物常数。美国华盛顿大学 Strand[20] 用生物膜 反应器研究了甲烷氧化菌(methane-oxidizing bacterium)降解三氯乙烯等有毒物质的动力学特 征,用一生物膜模型(biofilm model)计算甲烷和 有毒氯代烃的浓度变化。该模型模拟了有毒氯代 烃 和 甲 烷 通 过 甲 烷 单 氧 酶 (methane monooxygenase)氧化的竞争效应,并将二元底物 竞争/扩 散 动 力 学 模 型 (dual- competitivesabstrate/diffusion kinetics model)用于生物膜的底 物共同代谢(co-metabolism)过程,其方程为:

$$\frac{d^2S_1}{dX^2} = \frac{-r_1S_1}{1 + \frac{S_1}{K_1} + \frac{S_2}{K_2}};$$

$$\frac{d^2S_2}{dX^2} = \frac{-r_2S_2}{1 + \frac{S_1}{K_1} + \frac{S_2}{K_2}}$$

式中, S_1 、 S_2 : 甲烷、有毒氯代烃的浓度: r_1 、 r_2 : 最大降解速率; K_1 、 K_2 : Monod 系数; X: 离生物膜距离。荷兰 Oldenhuis $(1991 \oplus 1)^{[21]}$ 研究了三氯乙烯 (TCE) 和其它7种氯代脂肪烃通过菌株 Methylosinus trichosporium OB_{36} 的降解动力学特性,测定了动力学参数(见表 3)。

表 3 甲烷和氯代脂肪烃通过 M. triohosporium OB₃₆菌的降解动力学参数

基质	$K_m(\mu \mathbf{M})$	V _{max} (nmol•min ⁻¹ mg•细胞 ⁻¹)(K}¹ (ml min−1 • mg 细胞−1)	$c_{\rm t}^{2)}(\mu {f M})$	细胞量 ²⁾ (mg 细胞•ml ⁻¹)	$c_i^{3)}(\mu \mathbf{M})$
甲烷	92±30	363±50	3. 9	ND	0.14	ND
二氯甲烷	4 ± 1	33 ± 1	8	>100	0.11	>90
氯仿	34 ± 6	548 ± 55	16	160230	0.10	150
1,2-二氯乙烷	77 ± 9	65 ± 6	1	50-70	0.09	55
1,1,1-三氯乙烷	214 ± 18	24 ± 1	0. 1	>700	0.85	>80
1,1-二氯乙烯	5 ± 2	6 ± 1	1	20-30	0.09	22
反-1,2-二氯乙烯	148 ± 61	331 ± 89	2	90-150	0.12	75
顺-1,2-二氯乙烯	$30\!\pm\!10$	182 ± 29	7	130-260	0.07	185
三氯乙烯	145 ± 61	290 ± 99	2	70-100	0. 13	70

¹⁾一级速率常数(V_{max}/K_m) 2)对于实验所用细胞密度的最大允许的基质浓度

此外,Oldenhuis 和 Strand 等研究表明,在低基质浓度时,氯代脂肪烃类的降解一般表现为一级反应,即 r = K[S]。式中,r:基质去除速率; K:速率常数;[S]:基质浓度。

4 降解所用反应器

美国 Stranford 大学 Bouwer (1982 年)[22]最早用一装有颗粒活性炭(GAC)载体的玻璃柱 (φ25mm×250mm 长)研究了氯代苯及脂肪烃类的降解情况。当氯代有机物浓度在 10μg/L 和30μg/L 之间,停留时间为 60min 时,在好氧条件下,GAC 柱最初以 95%—98%的效率去除所有组分,但这些组分大都不是在柱内被生物降解的,原因可能是柱内微生物对组分的降解能力较弱,大部分氯代有机物被颗粒活性炭吸附而去除。1989 年,美国 Strandberg[23]设计了一固定膜填充床生物反应器,该反应器由一填有 0.6cm

弧鞍形陶瓷填料的玻璃柱(φ5cm×110cm 长)组 成。当三氯乙烯和二氯乙烯浓度为 1mg/L,4% (V/V)的甲烷和空气以 20ml/min 的流速进入反 应器顶部,停留时间为 50min 时,反应器内大于 50%的三氯乙烯和90%的二氯乙烯被生物共聚 体降解。目当周围环境温度为22-24℃时,浓度 在 0.15-5mg/L 范围的三氯乙烯表现为一级降 解关系,并测得三氯乙烯的表观一级降解动力学 常数约为 0.02min-1。美国 Tennessee 大学 Niedzielski 等[24]设计了一循环膨胀床生物反应 器。该反应器由一填有 70g 60/80 目的碎玻璃或 无烟煤作为载体的硼硅玻璃柱(φ2.7cm×44cm 长,总体积 235ml)和一充气柱(φ2.7cm×100cm 长,总体积 525ml)组成。之后,Phelps 等[25]用上 述反应器研究三氯乙烯的生物降解特性,在温度 维持 22℃,pH 为 7.2 的条件下,甲烷营养菌在 5d 之内降解了 80%—95%浓度为 20mg/L 的三

³⁾对于细胞密度为 0. 1mg·ml-1的最大允许的基质浓度

氯乙烯。美国路易斯安那州大学 Milier^[26]用一个球形硅藻土填充的 75L 固定微生物反应器,床层停留时间为 20.5h,采用连续流的方式处理含二氯乙烯(主要成分)、四氯乙烯和三氯乙烯污染物的混合地下水,当采用黄细菌自养菌株(Xantho bacter antotrophicus),废水流速为 1.5L/h,操作 42d后,平均有 90.2%的二氯乙烯被降解,81.7%的三氯乙烯及 64.0%的四氯乙烯也被降解。

总之,对氯代有毒物质的生物降解一般采用 固定膜生物反应器或循环膨胀床生物反应器。这 些反应器均以载体附着微生物,使细胞浓度大大 提高,增大有毒物质的去除率,同时也便于处理 后菌体与废水的分离。另外,载体还能贮存难降 解物质,直到微生物驯化而能降解该组分。而且 反应器中的生物膜具有保护某些敏感细胞的能 力,膜内的各种微生物的存在可为降解有机毒物 提供更好的生物体系与微环境,这些都有得于氯 代有机毒物的生物降解。然而,在采用固定床生 物反应器时,由于载体材料堆集较密,反应器内 氧气的传递及液体流动均会受到阻碍,液体滞留 量较大,存在较大程度的返混,形成相对静止区 和死区,这对于大量处理废水不利。因此,应根据 氯代有毒物质降解菌的细胞生长和降解动力学 特征,以及工厂含氯废水的实际排放情况设计合 适的生物反应器。

综上所述,采用生物法处理含氯代脂肪烃废 水这项技术的关键在于驯化出高效氯化物降解 菌株,并开发设计出合适的处理工艺。

参考文献

1 vogel T M et al. . Environ. Sci. Technol. . 1987, 21(8):722

- 2 Senior E et al. . Nature. 1976, 262: 476
- 3 Slater J H et al. . Journal of General Microbiology. 1979, 114; 125
- 4 Berry E K M et al. . Journal of General Microbiology. 1979,110: 39
- 5 Stucki G et al. . FEMS Microbiology letters. 1983,16:123
- 6 Brunner W et al. Appl. Environ. Microbiol. 1980, 40(5):950
- 7 Stucki G et al. . Arch Microbiol. . 1981, 130, 366
- 8 Leisinger T et al. . Jorunal of Bacteriology. 1985,162(2):676
- 9 Hartmans S et al. . Appl. Environ. Microbiol. . 1992, 58(4): 1220
- Janssen D B et al. . Appl. Microbiol. Biotechnol. . 1988, 29: 392
- Nelson M J K et al. Appl. Envion. Microbiol. 1987, 53(5);
 949
- 12 Wackett L P et al., Appl. Envion. Microbiol., 1988, 54 (7):
- 13 Oldenhuis R et al. Appl. Envion. Microbiol. 1989, 55 (11); 2819
- 14 Wackett L P et al. . Appl. Envion. Microbiol. 1989, 55 (11): 2960
- 15 Arciero D et al., Biochem. Biophys. Res. Commun. 1989, 159 (2):640
- 16 KAstner et al. . Appl. Envion. Microbiol. . 1991, 57: 2039
- 17 Little C D et al. . Appl. Envion. Microbiol. . 1988, 54(4): 951
- 18 Milde G et al. . Wat. Sci. Technol. . 1988, 20(3):67
- 19 Folsom B R et al. Appl. Envion. Microbiol. 1990, 56 (5): 1279
- 20 Strand S E et al. . Wat. Sci. Technol. . 1988, 20(11/12):167
- 21 Oldenhuis R et al. Appl. Envion. Microbiol. . 1991, 57(1):7
- 22 Bouwer E J et al. . Environ. Sci. Technol. . 1982, 16(2):836
- 23 Strandberg G W et al., Environ, Sci. Technol., 1989, 23(11);
- 24 Niedzielski J J et al. . Jorunal of Microbiological Methods. 1989, 10:215
- 25 Phelps T J et al. . Environ. Sci. Technol. . 1991, 25(8):1461
- 26 Miller G P et al. Environmental Progress. 1990, 9(3):161

(上接第 67 页)h#:样品的峰高(mm)。

D: 提取液总体积与用于分析部分的体积 比。

I':换算为参比状况下采样的体积(m³)。

对一些实际的大气飘尘样品用本法和乙酰 化滤纸层析-荧光分光光度法进行了对比测定, 结果如表 4 所示。测定偏差在±15%以内。

参考文献

- 1 城乡建设环境保护部环境保护局环境监测方法编写组.环境 监测分析方法. 沈阳:部环境保护局(沈阳印刷),1983,226
- 2 雷世寰.分析化学.1987,15(2):168
- 3 赵振华,全文熠. 环境科学学报,1988,8(2),242
- 4 姚渭溪等. 环境科学,1992,13(2):73
- 5 北京大学化学系分析化学专业,中国医科院卫生研究所环境 卫生研究室,卫生研究,1975,4,314
- 6 Sawiki E et al. . Internat. J. Air Pollu. . 1960, 2:273
- 7 Sawiki E et al. . Internat. J. Air Pollu. . 1960, 2:253

Abstracts

Chinese Journal of Environmental Science

ions were also studied and it was found that most of them exhibited an additive, antagonistic or synergistic action. Aromatic compounds were found to have a close relationship between their structures and toxicities, and those with different numbers and types of substituent had different toxicities. It was also found that in the process of treating the wastewater containing nitro- compounds, the toxicities of wastewater reduced with reducing concentrations of nitrobenzenes and COD.

Key words: toxicity assessment, structure and toxicity toxicants interaction, head- space gas chromatography, ecological toxicology.

Automatic Smokescope for Environmental Monitoring. Xing Ding' yao, Zhu Chang' yuan et al. (Luoyang Environmental Monitoring Station, Luoyang 471000); Chin. J. Environ. Sci., 15(3), 1994, pp. 75—76

An automatic monitoring smokescope has been developed, which is a modernized instrument that can make an automatic monitoring on a day-andnight continuous basis for the blackness of smoke emitted from boilers, having the functions of automatic sampling, and data storage, processing and display. The whole machine is controlled by a monoboard computer so that it can digitally display the monitored and computed data and timely monitor whether the smoke being emitted has complied. The instrument contains a failsafe system which can preserve the data even if a power cut has lasted for as long as 6 months and allows the instrument to be automatically resumed and continuously operated with the original intact data as soon as the power supply is restored. In the machine, the available data monitored during a 6 consecutive month period can be stored. With a properly modified software, the insturment can also be used to monitor the dust and smoke emissions from cement, ceramic, chemical and other industries, with the same effectiveness.

Key words: smoke density, smokescope, monitor, environmental monitoring.

Catalytic Potentiometry Using Malachite Green Ion Selective Electrode for the Determination of Nitrite in Water. Li Guirong and Wang Yongsheng (Teaching and Research Section of Basic Chemistry, Heng' yang Medical College, Heng' yang 421001); Chin. J. Environ. Sci., 15(3), 1994, pp. 77—79

A new catalytically potentiometric method for the determination of trace nitrite in water was developed, based on the ability of nitrite to catalyze the redox reaction of malachite green with potassium bromate in a phosphoric acid (H₃PO₄) solution. A malachite green ion selective electrode was used to

indicate the change in the concentration of malachite green that determined the reaction rate which was in turn proportional to the concentration of nitrite. This method showed a high sensitivity and selectivity, and had a linear relation in the range of $0-6\mu g/50$ ml of NO_2^- and a detection limit of $1.9\times 10^{-9} g/ml$ of NO_2^- . It can be operated conveniently at an ambient temperature. This method has been used to determine trace nitrite in environmental water samples with satisfactory results, relative standard deviation (RSD) of less than 4.3%, and average recovery of 99.7%.

Key words: nitrite, catalytic potentiometry, malachite green ion selective electrode.

Advance in Research on the Photocatalytic Organics Oxidation over Semiconductor Materials. He Beiping, Wang Zhansheng et al. (Dept. of Environmental Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084): Chin. J. Environ. Sci., 15 (3), 1994, pp. 80—83

A review was made on the photocatalytic oxidation of organic compounds over semiconductor materials as a catalyst, based on the findings reported in the including the mechanisms photocatalytic oxidation and degradation of organic compounds, the methods for improving photoactivity of semiconductor, and the development of fixedphase photocatalytic oxidation process. The trend of future studies on photocatalytic oxidation was suggested and it was predicted that the process of photocatalytic oxidation may become a new, effective method for water and treatment.

Key words: semiconductor, catalyst, photocatalytic oxidation, organic compounds.

Progress in Research on the Biological Treatment of Wastewater Containing Chlorinated Aliphatics. Fu Xuqing, Wang Shuxiong and Lu Dewei (UNILAB, Branch in the Zhejiang University, Research Center for Chemical Reaction Engineering, Hangzhou 310027); Chin. J. Environ. Sci., 15 (3), 1994, pp. 84—87

In order to address the issue of general concern posed by chlorinated aliphatics which are toxic or even carcinogenic and have caused underground water pollution in some locations, a review based on references was made on the biodegradation of chlorinated aliphatics, including the strains and enzyme systems involved in such a degradation, the mechanisms of degradation processes, the kinetics of degradation, and the reactors used for such a purpose. The review also relates to the conditions under which some of acclimated strains can degrade chlorinated aliphatics, the features of a strain having

Abstracts

Chinese Journal of Environmental Science

such a function, the possible paths of such a degradation and their kinetic models, the biodegradabilities of various components of chlorinated aliphatics, and an evaluation on the reactors which have been used for such a biodegradation.

Key words: biodegradation, chlorinated aliphatics, biological wastewater treatment.

Biodegradation and Transformation of Phthalic Acid Esters. Pang Jinmei et al. (Shanxi Academy of agri. Sci., Tai Yuan 030031); Chin. J. Environ. Sci., 15 (3), 1994, pp. 88—90

The environmental Pollution by phthalic acid esters (PAEs) and their degradation and transformation by micro-organism reported at home and abroad, were

reviewed with the following conclusions; (1) PAEs have been ubiguitously detected in air, ground, river, drinking water and other waters in the world; (2) Micro-organisms can degrade PAEs and utilize them; (3) Reaction rate of microbial PAEs degradation can follow the first order reaction kinetics; (4) Combined meta-bolization of mixed micro-organisms in PAEs biodegradation is better than pure culture effect; (5) PAEs are hydrolyzed by microbial enzymes to monoester and phthalic acid, then can be metabolized and transformed under aerobic conditions, at last degraded to CO_2 and water.

Key words: phthalic acid esters, micro-organism, enzymes, degradation, transformation.

(上接第 46 页)低扩散参数值越大。拟合扩散参数所反映的高度比国标和 Briggs 扩散参数的高度要高,因此拟合扩散参数要小于国标和 Briggs 扩散参数是合理的。

在某些稳定度下,拟合扩散参数大于国标和 Briggs 扩散参数,这与实测资料有关。出现这种 情况的原因有待于进一步研究。

本套拟合扩散参数一般适应于 100m 以上的高架源扩散情况。

拟合扩散参数曲线基本上与 Briggs 扩散参数曲线一致,与国标扩散参数曲线存在一定的差异,国标扩散参数曲线的倾角大于拟合扩散参数曲线的倾角。而实测扩散参数曲线大多都和拟合

扩散参数曲线接近,这表明拟合扩散参**数曲线基** 本符合实际情况。

致谢 本文得到徐大海先生的指导和帮助, 特此感谢。

参考文献

- 1 李卫英,王华聪,蔡存福.大气科学.1985,8(4):434
- 2 黄志丹. 环境科学技术. 1989,9(1):45
- 3 王景书,余秀芬,陈竹舟.环境科学学报.1989,9(1):100
- 4 蒋维楣,周朝辅,李宗恺,潘云仙.环境科学学报.1985,**5**(2); 112
- 5 李宗恺,潘云仙,孙润桥.空气污染气象学原理及应用.北京: 气象出版社,1985:278
- 6 林红,陈家宜. 大气污染物总量控制管理. 北京:海洋出版社, 1990;56

欢迎订阅《中国小造纸、小印染和高浓度有机废水 治理技术交流会论文汇编》

《中国小造纸、小印染和高浓度有机废水治理技术交流会论文汇编》(《环境科学》增刊)已于近期出版,《汇编》精选了由国家环保局科技标准司科研处主持的"小造纸厂污染防治技术交流会"和"小印染、高浓度有机废水污染防治技术交流会"交流的优秀科技论文 39 篇,介绍了适用性强、投资少、成本低和能耗低的新型治理工艺、新设备、新药剂等,包括小造纸厂黑液碱回收,木素综合利用产品开发,石灰法草浆厌氧处理技术,处理高浓度有机

废水的厌氧生物技术和处理印染废水的兼氧-好氧-生物 炭技术,高压脉冲电解法新设备等。

《汇编》约20万字,定价8元/册(含邮资)。欲订购者请将书款汇到北京2871信箱(邮编100085)《环境科学》编辑部,并请用正楷在汇款单上写清双方地址、邮政编码、姓名、款数、所购书名及数量,切勿多寄或少寄书款及在信中夹邮书款,也可携款到编辑部购买,联系电话:2545511-2138