

废水生物处理技术

吴婉娥 葛红光 张克峰 编著



化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

废水生物处理技术

吴婉娥 葛红光 张克峰 编著



化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

废水生物处理技术/吴婉娥, 葛红光, 张克峰编著.
北京: 化学工业出版社, 2003.1
ISBN 7-5025-4350-3

I. 废… II. ①吴…②葛…③张… III. 废水处
理: 生物处理 IV. X703.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 107665 号

废水生物处理技术

吴婉娥 葛红光 张克峰 编著

责任编辑: 管德存

文字编辑: 刘志茹

责任校对: 陶燕华

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市管庄永胜印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 8 $\frac{3}{4}$ 字数 225 千字

2003 年 2 月第 1 版 2003 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4350-3/X·246

定 价: 25.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

内 容 提 要

废水生物处理是目前及今后水污染控制和水资源控制和可持续利用的重要工程技术之一。本书系统介绍了废水处理的生物膜法、活性污泥法、厌氧生物处理法、生物脱氮除磷等方法。此外，还介绍了目前国内较新的尚处在开发阶段的生物强化技术及废水生态处理工程。本书具有一定的实用性和先进性。

本书适用于城市污水处理技术研究人员，污水处理工程的规划、设计、施工、管理等技术人员，以及从事生物技术、环境工程专业人员和大专院校师生参阅。

目 录

第1章 概 述

第一节 水体	1
第二节 水体污染	2
一、水体污染和污染源	2
二、水体污染的水质指标	3
三、废水特征	8
四、废水处理	9

第2章 水污染处理方法

第一节 废水物理处理法	10
第二节 废水化学处理法	11
一、混凝法	11
二、中和法	12
三、氧化还原法	13
四、电解法	13
第三节 废水物理化学处理法	14
一、吸附法	14
二、离子交换法	15
三、膜分离法	15
第四节 废水生物处理法	17
一、活性污泥法	17
二、生物膜法	18
三、厌氧生物处理法	18

四、自然生物处理法	18
-----------------	----

第3章 微生物反应过程动力学

第一节 概述	20
一、水环境中的微生物	20
二、微生物的新陈代谢过程	20
三、微生物的营养物质	23
第二节 微生物反应过程	25
一、微生物反应过程的主要特征	26
二、微生物反应动力学的描述方法	27
第三节 细胞生长动力学	32
一、微生物的生长曲线	32
二、无抑制的细胞生长动力学	35
三、有抑制的细胞生长动力学	38
四、细胞浓度对其比生长速率的影响	40
五、分批培养时的细胞生长动力学	40
六、细胞生长动力学的结构模型	42
第四节 基质消耗动力学	44
一、基质的消耗速率与比消耗速率	44
二、包括维持内源代谢的基质消耗动力学	46
第五节 产物生成动力学	48
一、代谢产物生成的动力学模型	48
二、微生物反应中的产热速率	51
第六节 非均相微生物反应过程动力学	52
一、气-液相传质与反应的相互影响	54
二、固相微生物体内的传质限制效应	58
第七节 灭菌动力学	64
第八节 动力学参数的估算	67
一、实验反应器	68
二、动力学参数的估算方法	70

第4章 活性污泥法

第一节 活性污泥法的基本原理	77
一、活性污泥与活性污泥法	77
二、活性污泥生长曲线与净化作用	78
三、活性污泥的性能指标	81
四、影响活性污泥净化反应的环境因素	83
五、BOD 负荷与污泥平均停留时间	85
第二节 活性污泥降解有机物的规律	87
一、基质浓度与其去除速率的关系	87
二、活性污泥的增长与 BOD 去除的关系	89
三、耗氧速率与基质 BOD 去除的关系	90
四、净化理论在活性污泥法中的应用	92
第三节 活性污泥法的运行方式	92
一、曝气池混合反应的类别	93
二、各种活性污泥系统	93
第四节 曝气原理与曝气池构造	101
一、曝气的作用与方法	101
二、氧的传递理论	104
第五节 活性污泥强化技术	106
一、高浓度活性污泥法	106
二、生物-铁法	106
三、粉末活性炭活性污泥法 (PACT 法)	107
第六节 活性污泥法系统的运行	108
一、活性污泥的培养与驯化	108
二、活性污泥法运行中常见的问题	109
三、活性污泥法运行中需要测定的主要项目	112

第5章 生物膜法

第一节 生物膜法基本原理	114
一、生物膜的形成及特点	115

二、生物膜净化废水的原理	116
第二节 生物滤池	117
一、生物滤池的构造	117
二、生物滤池的负荷	120
三、生物滤池的类型及运行系统	122
四、生物滤池中的回流问题	125
五、生物滤池的耗氧与供氧问题	125
六、生物滤池的处理效率	127
第三节 塔式生物滤池	128
第四节 生物滤池的运行	130
一、生物滤池运行的初始阶段（挂膜阶段）	130
二、生物滤池的日常运行管理	131
第五节 生物转盘	132
一、生物转盘的构造与组成	132
二、生物转盘的特点	134
三、生物转盘的工艺流程与组合	135
四、生物转盘在实际中的应用	136
第六节 其他形式生物膜法	137
一、生物接触氧化法	137
二、生物流化床	139
三、活性生物滤池	140

第6章 厌氧生物处理法

第一节 厌氧生物处理法基本理论	142
一、厌氧消化的三阶段理论	142
二、厌氧消化微生物	143
三、影响厌氧生物处理的因素	145
第二节 普通消化池和厌氧接触法	148
一、消化池的原理	148
二、消化池的构造	149
三、消化池的加热和搅拌	151

四、厌氧消化工艺流程	153
五、厌氧接触法反应动力学	154
第三节 厌氧污泥床	155
一、厌氧污泥床的性能与特点	155
二、厌氧污泥床的气、液、固三相分离器	157
三、厌氧污泥床的污泥特性	158
第四节 厌氧生物膜法	159
一、厌氧过滤床	159
二、厌氧膨胀床	160
三、厌氧流化床	162
四、厌氧生物转盘	163
第五节 两相厌氧生物处理法	164
一、两相厌氧处理法的工艺流程	164
二、两相厌氧处理法的特点	165

第7章 生物脱氮

第一节 生物硝化	168
一、氨化作用	168
二、硝化反应	169
三、硝化工艺流程	174
第二节 生物脱氮法	176
一、生物反硝化作用	176
二、反硝化反应动力学方程式	178
三、影响反硝化的环境因素	179
四、生物脱氮法的工艺流程	181

第8章 废水生物处理强化技术

第一节 固定化酶	189
一、固定化酶简介	189
二、酶的分离提纯	190
三、酶的固定化方法	190

四、可逆可溶性固定化酶	191
五、固定化酶反应器	194
第二节 固定化细胞	194
一、固定化细胞的特点	194
二、细胞固定化方法	194
第三节 固定化技术处理废水	195
一、固定化酵母细胞降解含酚废水	197
二、固定化混合菌细胞对印染废水脱色研究	202
三、厌氧固定化细胞	210
四、藻类固定化细胞	212
第四节 废水净化生物试剂添加技术	215
一、概述	215
二、LLMO 生物活液	219
三、投菌法净化印染废水	221

第9章 生物净化与生态处理系统

第一节 废水处理稳定塘	225
一、稳定塘概述	225
二、稳定塘的分类与功能	226
三、综合生物塘	232
第二节 水生植物塘	236
一、以水生大型植物为基础的处理系统	236
二、实现 AMATS 全年运转的途径	238
三、AMATS 的强化技术	239
第三节 污水土地处理系统	240
一、土地处理系统的组成	241
二、土地处理的净化机理	241
三、土地处理的方式	241
四、土地处理系统与污灌的主要区别	245
五、土地处理系统的净化效果	246
第四节 人工湿地处理系统	250

一、人工湿地生态系统	250
二、人工湿地的类型	251
三、人工湿地系统的组成	251
四、人工湿地的特点	252
五、影响人工湿地处理效果的因素	252
六、人工湿地的运行管理	255
七、芦苇湿地处理系统实例	255

附 录

附录一 污水中抑制生物处理的有毒物质的容许浓度	260
附录二 我国工业废水最高容许排放浓度 (1973年11月)	260
附录三 地面水环境质量标准 (GB 3838—1988)	261
附录四 农田灌溉水质标准 (GB 5084—1985)	263
附录五 渔业水质标准 (试行) TJ 35—1979	264
附录六 生活饮用水水质标准 (摘自 GB 5749—1985)	266
参考文献	267

第 1 章

概 述

第一节 水 体

水是地球上一切生命赖以生存、人类生活和生产必不可少的基本物质，它是宝贵的自然资源。约占地球表层地壳（5千米）的50%以上，覆盖地球表面积的70.8%。

地球上水的总储量约14000亿 m^3 ，其中97%以上是海水。在占地球总水量约3%的淡水中，77.2%分布在南北两极地带及高山高原地带，以冰帽或冰川形式存在，22.4%以地下水和土壤水的形式存在，湖泊、沼泽水占0.35%，河水占0.01%，大气中水占0.04%。其中，便于人们取用的淡水只有河水、淡水湖水和浅层地下水，其量估计约20亿 m^3 ，占地球总水量的0.2%左右。因此，淡水是一种极为有限的资源。

在环境学中，水体包括了水本身及其中存在的悬浮物、肢解物、肢体物、水生生物和底泥等完整的生态系统。

广义的水体有“类型”和“区域”之分。按水体类型，可将水体分为海洋水体和陆地水体两种，后者又分地表水体（包括河流、湖泊等）和地下水水体。按水体区域则是指某条水系所覆盖的地段而言。

由于水体具有广泛的生态系统的含义，区分“水”与“水体”的概念是十分重要的。例如某条河流受到重金属（如汞）污染，此

种污染物易被水中悬浮物吸附、络合而自水中转移至底泥内，从而使水中的重金属含量降低，导致未被察觉而误以为未受污染，但自底泥取样分析则会因其含汞量高而判断水体受到严重污染。

第二节 水体污染

一、水体污染和污染源

自然界的水受到各种复杂因素的影响，通常不是纯净的，其中含有物理、化学和生物的成分。水中各种成分及含量各有不同，反映到水的感官性状（色、臭、味、浑浊度等），物理化学性能（温度、反应值、电导率、氧化还原电势、放射性等），化学成分（无机物和有机物），水中生物组成（种群、数量）甚至其底泥状况彼此均有差异。由于人类生产和生活等人为的活动，不可避免地排出污染物，它们会通过不同途径进入水体而使水体受到污染，表征在水体中的物理化学性能和生物种群产生一系列变化。

早期的水体污染，主要是人口稠密的大城市所排出生活污水造成。后来在 18 世纪产业革命以后。工业生产排放的废水和废物成为水体污染的主要来源。随着工业的发展，水污染的范围不断扩大，污染程度日益严重。20 世纪 50 年代以后，在一些水域和地区，由于水体严重污染而危及人类的正常活动，70 年代以来采取了一些防治措施，部分水体的污染虽有所减轻，但全球性的水污染状况还在发展，尤其工业废弃物对水体的污染更具有潜在的危险性，若干水资源还因污染而降低或丧失了使用价值，改善和消除这种现象已是当务之急。

向水体排放污染物的场所、设备和装置称之为污染源，污染源也包括污染物进入水体的途径。现行的水体污染源的分类方法，如按造成水体污染的原因分为天然污染源和人为污染源两类；如按释放有害物种类分物理性污染源、化学性污染源、生物性污染源；按其分布特征，分为点污染源、面污染源和扩散污染源；按受污染的水体则分为地面水污染源、地下水污染源和海洋污染源。表 1-1 中



列出水体中主要污染物的来源。

表 1-1 水体中主要污染物分类和来源

种类	名称	主要来源	
物理性污染源	热	热电站、核电站、冶金和石油化工等工厂的排水	
	放射性物质(如铀及其裂变,衰变产物)	核生产废物、核试验沉降物,核医疗和核研究单位的排水	
化学性污染源	无机物	铬	铬矿冶炼、镀铬、颜料等工厂的排水
		汞	汞的开采和冶炼、仪表、水银法电解以及化工等工厂的排水
		铅	冶金、铅蓄电池、颜料等工厂的排水
		镉	冶金、电镀和化工等工厂的排水
		砷	含砷矿石处理、制药、农药和化肥等工厂的排水
		氰化物	电镀、冶金、煤气洗涤、塑料、化学纤维等工厂的排水
		氮和磷	农田排水;生活污水;化肥、制革、食品、毛纺等工厂的排水
	酸、碱和盐	矿山排水;石油化工、化学纤维、化肥造纸、电镀、酸洗和给水处理等工厂的排水、酸雨	
	有机物	酚类化合物	炼油、焦化、煤气、树脂等化工厂的排水
		苯类化合物	石油化工、焦化、农药、塑料、染料等化工厂的排水
油类		采油、炼油、船舶以及机械、化工等工厂的排水	
生物性污染源	病原体	生活污水;医院污水、屠宰、畜牧、制革、生物制品等工厂的排水;灌溉和雨水造成的径流	
	毒素	制药、酿造、制革等工厂的排水	

二、水体污染的水质指标

一般常用水质指标来表征水体受到污染的程度。反映水质的重要参数有悬浮物、有机物、生化耗氧量、反应值、细菌及有毒物质等。以下进行简要的讨论。

1. 悬浮物

水体中悬浮物质含量是水质污染的基本指标之一,表明的是水

体中不溶解的悬浮和漂浮物质，包括无机物和有机物。悬浮物对水质的影响为：阻塞土壤孔隙，形成河底淤泥，还可阻碍机械运转。

悬浮物能在1~2h内沉淀下来的部分，称之为可沉固体，此部分可粗略地表示水体中悬浮物之量。生活污水中沉淀下来的物质通常称作污泥，工业废水中沉淀的颗粒物则称作沉渣。

污泥中水的质量和污泥总质量之比称为污泥的含水率。污泥含水率的变化是设计污水处理构筑物时必须考虑的因素。当污泥的含水率由97.5%降至95%时，其固体物由2.5%增至5%，污泥的总体积随之减小1倍。即污泥的体积和污泥中固体物质的含量成反比关系，用式(1-1)表示为：

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{100 - P_2}{100 - P_1} = \frac{p_2}{p_1} \quad (1-1)$$

式中 V_1 、 V_2 ——污泥的体积；

P_1 、 P_2 ——污泥的含水率，%；

p_1 、 p_2 ——污泥中固体物质含量的百分率，%。

应加注意的是上述规律只适用于含水率大于75%~80%的污泥，此时可假定污泥体积与质量的关系相同于水的体积与质量的关系。若污泥的含水率继续降低，污泥将呈现多孔性，上面的假定不再适用。

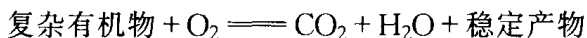
2. 有机物

生活污水和许多工业废水均含有机物。生活污水中的有机物主要是动、植物的残体和排泄物；从化学组成分析，主要是碳水化合物、脂肪和蛋白质。这些复杂的有机物主要由碳、氧、氢、氮、硫等元素构成。它们在污水中一般是不稳定的，在微生物的作用下，不断地进行分解，并转化为上述元素的无机物。这些无机物就成为植物的养料，通过植物的光合作用和同化作用，又合成为植物的机体。

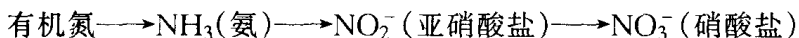
在有机物分解过程中，自由氧的存在与否，对分解的性质有决定性的影响。在有氧情况下，有机物的分解在好氧微生物（主要是



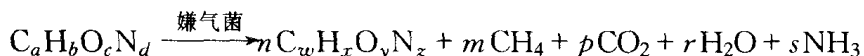
好氧细菌，又称好气菌）的作用下进行，称作好氧分解（也称好气分解）。稳定产物主要是 CO_2 、 H_2O 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} ，分解过程的时间较短。好氧分解的基本化学公式如下：



当反应中存在硫化物时，其最稳定的终点产物为硫酸盐离子 SO_4^{2-} 。同样，磷最终形成正磷酸盐 PO_4^{3-} 、氮经过逐步稳定的系列进程，最后生成硝酸盐。其化学式为：



如缺少氧气，有机物的分解则在嫌氧微生物（主要是嫌气细菌，又称嫌氧菌）的作用下进行，称作嫌气分解（也称厌氧分解）。稳定产物主要是 CH_4 、 CO_2 、 H_2O 、 NH_3 、 H_2S 、 H_2 ，分解过程缓慢，而且放出恶臭。理想的化学公式如下：



实际分解过程中， CH_4 、 CO_2 和 NH_3 约占产生气体的 95%~98%，剩余的气体是 H_2S 和 H_2 。

3. 生化需氧量

污水中的有机物种类繁多，如要对这些物质进行各个组成元素的定性和定量分析，需耗费大量时间、人力和物力。通常采用概括性的指标借以表示受有机物污染的程度。

在有机物的好氧分解过程中，需要消耗一定数量的氧。污水的生物化学需氧量（简称生化需氧量或 BOD）即好氧分解时微生物利用污水中可分解的有机物质所消耗的氧量，常以此值作为计量污水中有机物的代表。

有机物的好气分解，一般分两个阶段进行。图 1-1 是生活污水由于有机物分解而消耗氧进程曲线，图中纵坐标为消耗的氧量，以 (mg/L) 计，横坐标为分解进行的天数。当污水温度为 20℃ 时，第一阶段进行约 16d，第二阶段约自第 20d 开始，持续较长时间。自第 16~20d 为过渡期。在第一阶段，通过微生物的作用，有机的

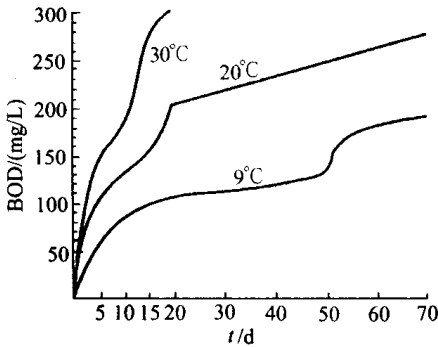


图 1-1 不同温度的污水分解生化需氧量曲线

碳、氢、氮转化为无机的二氧化碳、水和氨。等此段进程达到一定程度接近完成时，出现另一类生化过程。污水进行好氧分解，第一阶段所需的时间因水温有所不同，如图 1-1 可见，当水温高于 20℃ 时，所需时间较短，而当水温低于 20℃ 时，需时较长。

污水中有机物分解的第二阶段主要依靠硝化细菌使氨氧化为亚硝酸和硝酸。氨的硝化，对环境影响较小，因此污水的生化需氧量通常只指第一阶段的耗氧量。试验研究结果表明，此阶段污水中有机物在各时刻的耗氧速度与该时刻污水中有机物含量成正比关系，一般可以认为：若污水中有机物含量高时，其耗氧速率加快。

图 1-1 还表明，污水完全稳定需要很长的时间。若按例行的污水检验，要采用很长的培养期来测定污水的生化需氧量，显然是不现实的。即使采用 20d 以测定第一阶段的数值，仍为时过长。考虑到耗氧速率一般在开始时最快，5d 内能降低生化需氧量 68% 左右，因此目前多规定：将污水在 20℃ 温度下培养 5d，作为 BOD 检验的标准，在此条件下测得的结果称作 5 日生化需氧量，记作 BOD_5 。一般生活污水的 5 日生化需氧量约为 $40g/(人 \cdot d)$ 。

4. 化学需氧量

在酸性条件下，强氧化剂能使污水中全部有机物氧化。用化学氧化剂氧化污水或工业废水中有机污染物所耗用的氧量即为化学需氧量，用 COD 表示，其单位为 (mg/L)。COD 愈高，表示污水或废水中的有机物愈多。目前常用的氧化剂主要为重铬酸钾 ($K_2Cr_2O_7$) 和高锰酸钾 ($KMnO_4$)，测得的数值分别为化学需氧量和耗氧量，后者用 DO 表示。