



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

环境工程专业主干课程短学时系列教材

# 水污染 控制工程

罗固源 主编

DO

pH

Al

Hg



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
环境工程专业主干课程短学时系列教材

# 水污染控制工程

罗固源 主编

高等教育出版社

## 内容提要

本书为全国环境工程专业主干课程短学时系列教材之一,是为适应目前学科发展和人才培养的需求而编写的应用型本科教材,适合 50 学时左右的教学。

本书在对现行教材内容提炼的基础上,增加了当前本领域新的技术、理论和设计原理。本教材以污水处理理论与工程技术的基本原理为起点,把全书分为八章。着重介绍目前普遍存在的典型水污染、水质指标,污染控制的生物化学和物理化学原理、技术措施和设计计算;在内容上力求做到理论与工程设计相结合,并尽量吸取先进国家在水污染控制方面的技术理论和设计方法,以满足污水处理技术的设计运行、工程建设及维护管理的实际需要。

本书可作为高等院校环境工程、环境科学及相关专业教学用书,也可供环境科技人员和相关管理人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

水污染控制工程 / 罗固源主编. —北京: 高等教育出版社, 2006. 11

ISBN 7-04-020062-7

I. 水... II. 罗... III. 水污染-污染控制-高等学校-教材 IV. X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 113266 号

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷	唐山市润丰印务有限公司		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
		畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开 本	787×960 1/16	版 次	2006 年 11 月第 1 版
印 张	30	印 次	2006 年 11 月第 1 次印刷
字 数	560 000	定 价	34.10 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 20062-00

# 编写委员会成员

主任委员 罗固源

成 员 宁 平 蒋文举 张承中 陈杰榕

# 序

高等学校环境工程专业主干课程短学时系列教材与本专业“水污染控制工程”、“大气污染控制工程”、“固体废弃物处理与处置工程”、“环境影响评价”、“环境规划与管理”、“环境工程原理”、“环境监测”、“物理性污染控制”8门核心课程相对应,其内容在近年来不断进行教学改革的基础上已经历过十年以上的应用和教学实践,并根据我国高等学校本科环境工程专业相关课程的基本要求,受教育部全国高等学校环境科学与工程教学指导委员会环境工程分委员会的委托组织编写的。各分册主编都具有非常丰富的教学经验,本系列教材各门课程的讲义在很多学校都进行了试用(见各分册材料),教学效果很好。

本系列教材是一套学时短,但内容精练的教材。教材的编写根据环境工程专业本科学生培养目标,针对当前各高校学时缩短和教学改革的情况,适应目前学科发展和人才培养的需求,全面整合教学内容,突出本学科相关知识在实践中的应用,注重学生实际操作能力的培养,强调系列课程教材的整体性和系统性,尽可能避免课程间内容的重复。

本系列教材从体系结构到内容具有新颖、系统、全面、科学、实用和普及的特点,注意与相关课程的区别与联系。教材的取材和内容的深度都尽量充分考虑符合我国环境工程专业人才培养目标及课程教学的要求,能反映本学科研究和发展的先进成果和完整地体现相应课程应有的知识,重点考虑如何有利于学生认识、分析和解决环境污染控制与污染物的处理、处置原理和方法等相关问题的掌握与应用以及对环境污染防治的发展战略、规划、建设项目及其它开发活动的实施行为进行分析、预测和评估,提出防治的对策与措施。

本系列教材也可用于环境工程领域工程技术人员的培养与培训,同时可作为工业企业环境保护与环境工程专业及管理的重要参考书。

本系列教材由重庆大学、四川大学、昆明理工大学、西安交通大学、西安建筑科技大学负责组织编写,重庆大学罗固源教授担任编委会主任。各教材的主编分别是:《水污染控制工程》:罗固源教授(重庆大学);《大气污染控制工程》:蒋文举教授(四川大学);《固体废弃物处理与处置工程》:宁平教授(昆明理工大学);《环境影响评价》:曾向东教授(昆明理工大学);《环境规划与管理》:张承中教授(西安建筑科技大学);《环境工程原理》:陈杰蓉教授(西安交通大学);《环境监测》:但德忠教授(四川大学);《物理性污染控制》:陈杰蓉教授(西安交通大学)。

全国高等学校环境工程教学指导分委员会组织了对本系列教材的编写审查。

环境科学与工程教学指导委员会主任委员、中国工程院院士、清华大学郝吉明教授担任本系列教材的主审,环境工程教学指导分委员会副主任委员、同济大学周琪教授担任本系列教材的副主审。编者在此深表谢意,并恳请各位读者对书中的不妥之处,批评指正。

罗固源

2006-02-20

# 前 言

本书是高等学校环境工程专业主干课程短学时系列教材之一。本教材按50学时编写,在对现行教材内容提炼的基础上,加入了当前水污染控制方面新发展的技术、理论和设计原理。在内容上有三个特点:①结合污水处理单元过程引入反应器理论基础,并把污水均化与反应过程物料平衡的累积项相结合,提高均化过程的理论性和技术含量;②引入污水的深度处理,并介绍生物脱氮除磷的新工艺;③引入面源污染控制的生态工程治理技术及设计原理。在结构上考虑到现代污水生化处理技术的新发展,以及物化处理过程多,涉及基本原理比较复杂,因此,本教材以污水处理理论与工程技术的基本原理为起点,把全书分为八章。着重介绍了目前普遍存在的典型水污染、水质指标,污染控制的生物化学和物理化学原理、技术措施和设计计算;在内容上力求做到理论与工程设计相结合,并尽量吸取先进国家在水污染控制方面的技术理论和设计方法,以满足污水处理技术的设计运行、工程建设及维护管理的实际需要。

本书由重庆大学、西安建筑科技大学、西安交通大学、西南交通大学、解放军后勤工程学院的一些教师共同编写。各章节的作者是:第一章:刘红霞、许晓毅;第二章:罗固源;第三章:罗固源、许晓毅;第四章:王涛;第五章:许晓毅;第六章:彭党聪;第七章:付永胜、杨红薇;第八章:谢有奎。全书由罗固源主编;许晓毅负责全书的校对。

2005年11月16日-11月18日环境工程主干课短学时系列教材编委会特邀教育部环境科学与工程专业教学指导委员会环境工程分委员会主任委员郝吉明教授,副主任委员周琪教授参加了在四川大学召开的系列教材审稿会,并担任本系列教材的主审。本书的主审由周琪和宁平教授担任。

本书作为高等学校“水污染控制工程”课程的教材,适合我国环境工程专业多年来的本科教学改革和发展的需要。本书也为污水处理领域重、难点的深入研究奠定了相应的理论基础,也可用于环境工程领域工程技术人员的培养与培训,同时可作为市政工程及工业企业环境工程技术及管理人士的参考书。

编 者

2006-04-30

# 目 录

<b>第一章 水污染与水质指标</b> .....	1
<b>第一节 水污染及其危害</b> .....	1
一、需氧有机物污染 .....	4
二、水体富营养化 .....	8
三、毒物污染 .....	10
四、放射性水污染 .....	12
五、其它水污染 .....	15
<b>第二节 污水水质与水质污染指标</b> .....	17
一、污水水质 .....	17
二、水质指标 .....	19
<b>思考题与习题</b> .....	22
<b>第二章 反应器理论基础与污水的均化</b> .....	24
<b>第一节 反应器理论基础</b> .....	24
一、物料平衡与均相反应器 .....	24
二、间歇反应器 .....	26
三、连续搅拌罐式反应器 .....	26
四、串联式 CSTR .....	28
五、活塞流反应器 .....	29
<b>第二节 反应效率比较</b> .....	30
一、去除百分数与去除率 .....	30
二、BR 和 PFR 的比较 .....	31
三、CSTR 和 PFR 的比较 .....	32
四、串联式 CSTR 与 PFR 的比较 .....	33
<b>第三节 污水的均化</b> .....	35
一、均量 .....	35
二、均质 .....	37
三、均化 .....	40
<b>思考题与习题</b> .....	41
<b>第三章 污水的物理化学处理</b> .....	42
<b>第一节 固液分离与膜分离过程</b> .....	42



一、格栅 .....	42
二、沉淀过程 .....	44
三、上浮过程 .....	70
四、离心分离技术 .....	87
五、过滤 .....	91
六、膜分离法 .....	107
<b>第二节 化学沉淀与酸碱中和 .....</b>	<b>121</b>
一、化学沉淀处理 .....	121
二、酸碱中和处理法 .....	127
<b>第三节 氧化还原处理 .....</b>	<b>133</b>
一、氧化法 .....	133
二、还原法 .....	141
三、电解处理 .....	142
<b>第四节 化学混凝过程 .....</b>	<b>146</b>
一、凝聚与絮凝的机理 .....	147
二、混凝剂及其配制与投加 .....	151
三、混凝反应器的设计计算 .....	162
四、混凝处理法在污水处理中的应用和发展 .....	168
<b>第五节 吸附与离子交换处理法 .....</b>	<b>170</b>
一、吸附 .....	170
二、离子交换法 .....	187
<b>思考题与习题 .....</b>	<b>200</b>
<b>第四章 污水的生物处理 .....</b>	<b>202</b>
<b>第一节 概述 .....</b>	<b>202</b>
一、污水生物处理的概念 .....	202
二、污水生物处理的对象 .....	202
三、污水生物处理的类型 .....	203
四、生物处理的基本原理 .....	203
<b>第二节 微生物的生长和动力学基础 .....</b>	<b>207</b>
一、微生物的生长规律 .....	207
二、微生物的生长环境 .....	209
三、微生物生长动力学 .....	211
<b>第三节 污水的好氧生物处理——活性污泥法 .....</b>	<b>216</b>
一、活性污泥法的基本概念 .....	216
二、活性污泥法的基本流程 .....	217

三、活性污泥的形态、组成及性能指标 .....	218
四、活性污泥的增殖规律 .....	220
五、活性污泥净化反应过程 .....	222
六、活性污泥法基本数学模型 .....	223
七、曝气的理论基础和曝气方法 .....	229
八、活性污泥法的工艺类型 .....	240
九、活性污泥法的设计 .....	250
十、活性污泥法系统的运行管理 .....	253
<b>第四节 污水的好氧生物处理——生物膜法 .....</b>	<b>258</b>
一、生物膜法概述 .....	258
二、生物滤池 .....	262
三、生物转盘 .....	280
四、生物接触氧化 .....	286
五、生物流化床 .....	292
<b>第五节 污水的厌氧生物处理 .....</b>	<b>296</b>
一、污水厌氧生物处理的原理 .....	297
二、污水的厌氧生物处理方法 .....	299
三、厌氧生物处理法的设计 .....	302
四、厌氧和好氧技术的联合运用 .....	304
<b>思考题与习题 .....</b>	<b>305</b>
<b>第五章 污水的深度处理及回用 .....</b>	<b>307</b>
<b>第一节 概述 .....</b>	<b>307</b>
一、污水再生回用的目的及意义 .....	307
二、污水的深度处理与三级处理 .....	307
<b>第二节 城市污水深度处理的工艺原理与技术 .....</b>	<b>308</b>
一、城市污水深度处理对象 .....	308
二、城市污水除氮与脱氮 .....	310
三、城市污水除磷 .....	322
四、城市污水同步生物脱氮除磷 .....	332
五、其它深度处理技术 .....	339
六、各种深度处理工艺组合 .....	339
<b>第三节 处理后污水的再利用 .....</b>	<b>341</b>
一、国内外城市污水回用的概况 .....	341
二、城市污水回用途径与工艺流程 .....	343
三、再生回用水的水质要求与标准 .....	350

思考题与习题 .....	355
<b>第六章 污泥的处理与处置 .....</b>	<b>357</b>
<b>第一节 污泥的种类、特性及数量 .....</b>	<b>357</b>
一、污泥的种类 .....	357
二、污泥的特性 .....	357
三、污泥的数量 .....	360
<b>第二节 污泥处理工艺 .....</b>	<b>360</b>
<b>第三节 污泥浓缩 .....</b>	<b>361</b>
一、重力浓缩 .....	361
二、气浮浓缩 .....	366
三、离心浓缩 .....	368
<b>第四节 污泥调理与脱水 .....</b>	<b>369</b>
一、污泥调理 .....	369
二、自然脱水 .....	370
三、机械脱水 .....	371
<b>第五节 污泥稳定 .....</b>	<b>377</b>
一、污泥的生物稳定 .....	377
二、污泥的化学稳定 .....	382
<b>第六节 最终处置与综合利用 .....</b>	<b>383</b>
一、污泥的综合利用 .....	383
二、湿式氧化 .....	384
三、弃置 .....	384
四、焚烧 .....	385
思考题与习题 .....	386
<b>第七章 污水的生态工程处理技术 .....</b>	<b>387</b>
<b>第一节 稳定塘 .....</b>	<b>388</b>
一、概述 .....	388
二、稳定塘的工作原理 .....	389
三、稳定塘的类型 .....	390
四、稳定塘的计算公式 .....	391
五、稳定塘应用工程实例 .....	392
<b>第二节 废水土地处理系统 .....</b>	<b>393</b>
一、概述 .....	393
二、废水土地处理系统的工艺类型 .....	394
三、废水土地处理系统的净化原理 .....	397

---

四、废水土地处理系统应用工程实例 .....	399
<b>第三节 人工湿地</b> .....	400
一、概述 .....	400
二、人工湿地的净化机理 .....	402
三、人工湿地的类型 .....	405
四、人工湿地应用工程实例 .....	406
<b>第四节 污水的生态工程处理技术在面源污染防治方面的应用</b> .....	408
一、概述 .....	408
二、应用污水生态工程处理技术防治面源污染 .....	409
<b>思考题与习题</b> .....	410
<b>第八章 城市污水处理厂的设计</b> .....	412
<b>第一节 城市污水处理厂的设计步骤</b> .....	412
一、可行性研究 .....	412
二、初步设计 .....	414
三、施工图设计 .....	416
<b>第二节 城市污水处理厂厂址选择</b> .....	417
<b>第三节 污水处理工艺流程的选择</b> .....	418
一、选择污水处理工艺流程的影响因素 .....	418
二、城市污水处理工艺的典型流程 .....	419
<b>第四节 城市污水处理厂平面布置与高程布置</b> .....	420
一、污水处理厂平面布置 .....	420
二、污水处理厂高程布置 .....	422
<b>主要参考文献</b> .....	425
<b>附录一 《污水综合排放标准》(GB 8978—96)</b> .....	427
<b>附录二 《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)</b> .....	440
<b>附录三 《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)</b> .....	448
<b>附录四 《生活杂用水水质标准》(CJ/T 48—1999)</b> .....	460
<b>附录五 氧在蒸馏水中的饱和溶解度</b> .....	462

# 第一章 水污染与水质指标

## 第一节 水污染及其危害

水是人类维系生命的基本物质,是工农业生产和城市发展不可缺少的重要资源。人类习惯于把水看作是取之不尽、用之不竭的最廉价的自然资源,但随着人口的膨胀和经济的发展,水资源短缺的现象正在很多地区相继出现,水污染及其所带来的危害更加剧了水资源的紧张,并对人类的生命健康形成了威胁。切实防治水污染、保护水资源已成了当今人类的迫切任务。

地球上水的总量约有  $14 \times 10^8 \text{ km}^3$ , 其中约有 97.3% 的水是海水,淡水只占总水量不足 3% 的比例,其中还有约 3/4 以冰川、冰帽的形式存在于南北极地,人类很难使用,与人类关系最密切、又较易开发利用的淡水储量约为  $400 \times 10^4 \text{ km}^3$ , 仅占地球上总水量的 0.3%, 这部分淡水在时空上的分布又很不均衡,如表 1-1 所示。

表 1-1 地球上的水量分布

水的类型	水量/ $10^4 \text{ km}^3$	比例/%
海洋水	132 000	97.3
淡水湖	12.5	0.009
盐湖和内海	10.4	0.008
河流	0.1	0.0001
土壤水	6.7	0.005
地下水	835	0.6
冰冠和冰川	2920	2.1
大气水	1.3	0.001
总计	135 786	100

以我国为例,我国的水资源总量并不贫乏,其降水量为  $60\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$  左右,相当于全球陆地降水总量的 5%,居世界第三位。其地面年径流量为  $27\,210 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 仅少于巴西、苏联、加拿大、美国和印尼,居世界第六位。但由于我国人口众多,按人均年径流量计,每人每年仅为  $2400 \text{ m}^3$ , 只相当于世界人均占有量的 1/4。我国的水资源还存在着严重的时空分布不均衡性。淮河以北所拥有的

水资源量仅为全国水资源总量的 19%，而这一地区的耕地面积却是全国耕地面积的 64%，反之，淮河以南地区的耕地面积仅占全国耕地面积的 36%，其水资源拥有量却为全国水资源总量的 81%。如果有一条斜线将中国分为东南和西北两大区，则占据国土面积 53% 的东南沿海地区，拥有全国水资源总量的 93%，而西北广大地区却只有 7% 的水资源量。在水资源缺乏的西北地区，十分有限的降雨又往往集中在夏季的三个月内，使水资源紧缺的情况更为加剧。

地球上的水主要以连续状态存在。存在于地上者，称为地面水，包括海洋、江河、湖泊、水库、冰川等；存在于地下者，称为地下水，包括潜水和承压水；地下水涌出地面者称为泉水。以不连续状态存在的水虽分布很广，但数量较少，主要为存在于大气中的水、储存于生物体内的水和储存及结合于岩石土壤中的水。

自然界中的水并不是静止不动的，而是处于不断的循环运动中，包括自然循环和社会循环。自然循环是由自然力促成的水循环，例如，海洋、湖泊、河流表面以及土壤中植物茎叶上的水，会由于阳光照射而蒸发或蒸腾成水汽，上升到空中凝结为云，又随大气环流迁移到各处，并在适当的条件下以雨、雪、雹等形式降落到地面，或汇集至江河湖泊，成为地面径流，或渗入地下，形成地下水。地表水和地下水也是时有交流转换的，它们最终都会注入海洋。如此川流不息，循环往复，如图 1-1 所示。

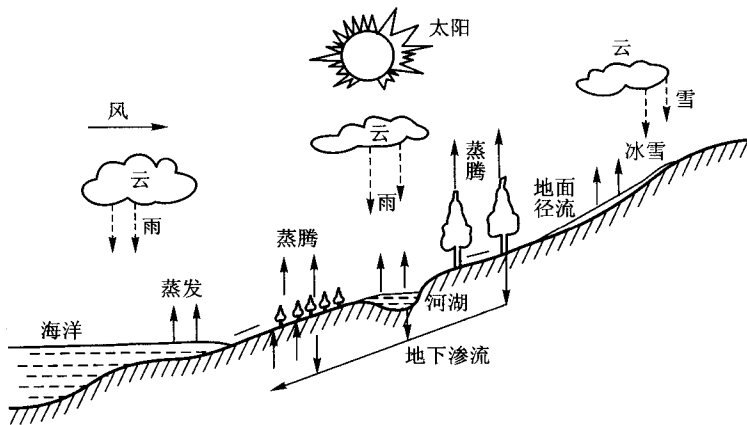


图 1-1 水的自然循环

人们通常以降水量作为衡量循环水量的大致尺度。据推算，整个地球上的降水量约为每年  $40 \times 10^4 \text{ km}^3$ ，因此每年的自然循环水量仅占地球上总水量 ( $14 \times 10^8 \text{ km}^3$ ) 的 0.03% 左右。按多年平衡的情况计，这些循环水量中约有 56% 的水量为植物蒸腾、土壤和地面水体蒸发所消耗，34% 形成地面径流，10% 则通过下

渗补给地下水。

除了上述水的自然循环外,水还由于人类的活动而不断地迁移转化,形成水的社会循环,直接为人们的生活和生产服务。与水的自然循环不同的是,在水的社会循环中,水的性质在不断地发生变化,生活污水和工业生产废水的排放,是形成水污染的主要根源,也是防治水污染的主要对象。例如,人类取用的水中,只有很少一部分是作为饮用水或食物加工以满足生命对水的需求的(约为每人每天 5 L 水),其余大部分水则用于卫生目的,如洗涤、冲厕等(约为每人每天 50~300 L 水不等,决定于生活习惯、卫生设备水平等)。工业生产用水量很大,除了用一部分水作为工业原料外,大部分是用于冷却、洗涤或其它目的,使用后水质将发生显著变化,其污染程度随工业性质、用水性质及方式等因素而变。此外,随着农业生产中化肥、农药使用量的日益增加,降雨后农田径流会挟带大量化学物质流入地面或地下水体,形成所谓“面源污染”,也是不可忽视的一项污染源。

图 1-2 为水循环系统示意图,它包括了水的自然循环和社会循环。

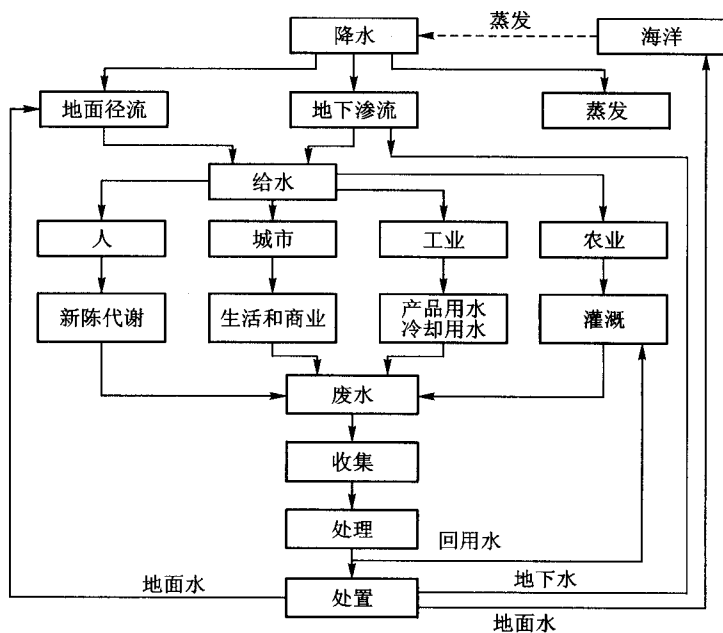


图 1-2 水循环系统

在水的循环过程中,由于非环境污染进入水中的杂质,称为自然杂质或本底杂质;由于环境污染进入水中的杂质,称为污染物。当进入水体中的污染物量超过了水体自净能力而使水体丧失规定的使用价值时,称为水体污染或水污染。

水环境可受到多方面的污染,其中主要污染源有:① 大气降水及地面径流;② 农业面源污染;③ 向自然水体排放的各类污、废水;④ 垃圾、固体废弃物及其渗出液;⑤ 船舶废水、固体废弃物及船舶漏油。其中最普遍的污染源为降雨及农业面源污染和排放的各类污、废水。

水环境的污染源虽有以上许多方面,但由污、废水排放引起的水体污染有需氧有机物污染、水体富营养化、毒物污染、放射性污染等基本类型。

本章将分别讨论典型水污染类型及主要水质指标。

## 一、需氧有机物污染

从有机物能否被微生物吸收利用角度出发,可大致把存在于废水中的有机污染物分为 3 大类:

① 可生物转化的有机物:废水中含有的淀粉、脂肪、蛋白质、核酸,及其水解产物的单糖、甘油、脂肪酸、氨基酸等,以及后续发酵产物的低分子有机酸、醇和酮等,均属于可生物降解的有机物。这些有机污染物主要是人和动物的排泄废物、动植物的残体以及工业发酵的残液、废渣等。

② 难生物转化的有机物:废水中含有的烃类、硝基化合物、有机农药及有机染料等,在低浓度下可被微生物缓解吸收利用;在较高浓度下因产生抑制作用而难以吸收利用。此外,纤维素虽无毒性,但生物转化速率很慢。这类有机污染物广泛存在于化工废水、制药废水、造纸废水中。

③ 不能生物转化的有机物:废水中含有的塑料、橡胶等高分子聚合物,基本上不能被微生物吸收利用。

可生物转化的有机物被水体中的微生物吸收利用时,要消耗水中的溶解氧。溶解氧降低到一定程度后,就会影响多数水生生物的生存环境。溶解氧耗尽后,水中有机物就会腐败,致使水体发臭变黑,水环境恶化。这种由于废水中的有机物而引起的水体污染,称为需氧有机物污染,而能通过生化作用而消耗水中溶解氧的有机物被称为需氧有机物。我国绝大多数水环境的有机污染属于这种污染类型,以下主要进行需氧有机污染的介绍。

### (一) 耗氧作用定律

早在 1944 年,人们就发现,水中有机物质的生物化学氧化率与水中的有机物的浓度之间的关系符合一级反应规律。即有:

$$L_t = L_0 \times 10^{-k_1 t} \quad (1-1)$$

式中: $L_0$ ——起始时的有机物浓度,mg/L;

$L_t$ —— $t$ 时刻的有机物浓度,mg/L;

$k_1$ ——耗氧速率常数,以日(d)为单位,普通生活污水在 20℃时, $k_1$ 值约为



0.1 d;

$t$ ——降解时间, d。

由式(1-1),当  $L$  用降解百分数表示时,  $L_0=100$ , 则式(1-1)可写为:

$$\lg L_t = 2.0 - k_1 t \quad (1-2)$$

由式(1-2)可求得不同温度下需氧有机物分解过程的试验曲线, 见图 1-3。由此曲线即可求得不同温度下的  $k_1$  值。

当温度为  $20^\circ\text{C}$ ,  $k_1=0.1$  时, 由图 1-3 可得水体中有机物的正常氧化速率, 见表 1-2。

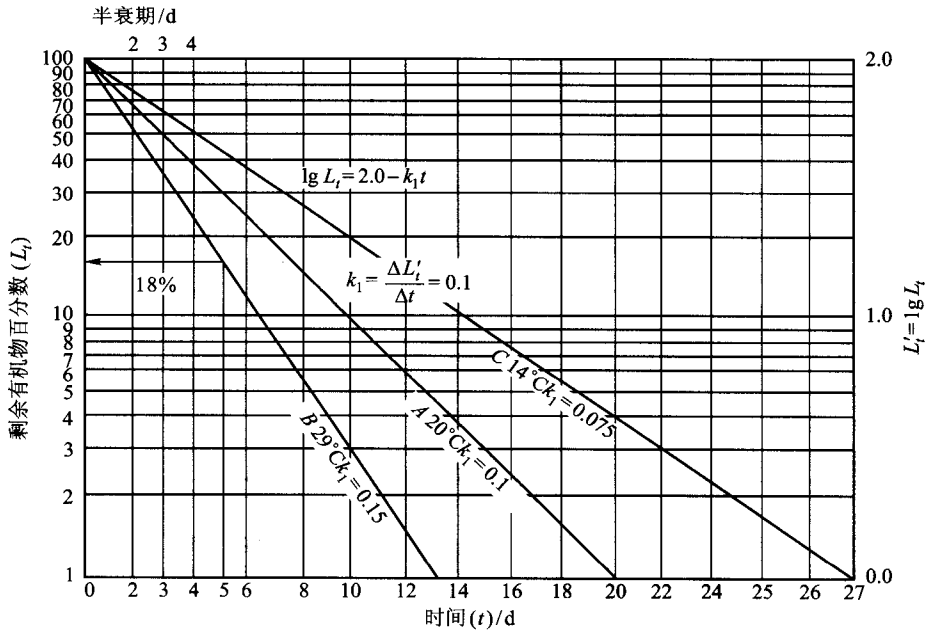


图 1-3 需氧有机物分解过程实验曲线

### (二) 复氧作用定律

当耗氧使水中溶解氧下降到饱和浓度以下时, 大气中的氧便向河流补充, 这种作用称为复氧作用。复氧作用受溶解定律与扩散定律所控制。当其它条件一定时, 氧溶解于水的速率主要取决于水中的氧亏量  $D$  (即氧不足量), 且与其成正比关系, 即:

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad (1-3)$$