

普通高等教育“十一五”规划教材

水污染控制工程

王郁 主编

林逢凯 副主编



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”规划教材

水污染控制工程

王郁 主编 林逢凯 副主编

曹国民 孙贤波 陈秀荣 编



化学工业出版社

·北京·

本书首次反映了“废(污)水和受污染水体是污染物的稀水溶液”的观念,用反应工程和分离工程理论探讨在低浓度水溶液中进行的各单元过程及其必需的反应器,揭示水污染控制过程的本质及规律。

全书共分十一章。内容主要包括反应工程和分离工程及其反应器的理论基础;水的点污染控制过程,即物理、化学、物理化学和生物处理过程;水的非点污染控制过程,即水体的自净、微生物和生态修复工程等;为强调知识的系统性,特介绍了单元过程的组合原则及典型流程,以作示范。

本书可作为环境工程本科生教材,还可供相关专业的研究生、教学人员、相关科研、设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水污染控制工程/王郁主编. —北京:化学工业出版社,
2007.12

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-122-01477-1

I. 水… II. 王… 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(2007)第184852号

责任编辑:满悦芝

文字编辑:刘莉珺

责任校对:蒋宇

装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张30½ 字数891千字 2008年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:48.00元

版权所有 违者必究

前 言

水污染控制工程是环境工程不可缺少的一部分。环境工程专业主干课程“水污染控制工程”的教材，对培养环境保护工作者具有重要的作用，至今已有多种版本面世。编著者从“将废（污）水和受污染水体均认为污染物的稀水溶液”概念出发，提出了本书新的内容框架。

本书强调了水污染控制工程知识的系统性，涵盖了水的点污染控制工程和非点污染控制工程两大部分，前者针对人类生产和生活活动中产生的废（污）水的处理过程，而后者是受污染水体的自净过程及其修复工程。书中根据污染程度及排放标准要求，设置了处理过程组合原则及典型应用实例的章节，以作示范。对点污染控制工程和非点污染控制工程而言，均涉及低浓度水溶液系统的反应工程和分离工程，其过程的推动力很小，为此将反应工程、分离工程及过程实施的反应器的理论基础单独成章、集中讨论；并将之在各章中分别展开，即为单元过程的过程分析；单元过程的机理和动力学探讨、影响因素分析、工艺参数和设计参数的选择与确定等；反应器的形式、结构和尺度与过程的类型、性质和反应条件有着密切的关系，故在各过程中进行了相应的选择、设计及应用探讨。

本书总结了前教材《水污染控制工程》（由王郁、金人中编写）在华东理工大学环境工程专业十余年本科教学实践的经验及来自学生的反馈，经不断增删、修改后定稿，期望学生学习本书后，在工作和深造中，不仅能成为本书知识的应用者，更是水污染控制工程的决策者、研究者和设计者。本书亦可作为环境工程专业研究生、教师、相关科研院所开发人员和环境工程工作者的参考书。本书共十一章，第一章、第二章和第十一章由林逢凯负责编写；第三章和第四章由孙贤波负责编写；第五章由曹国民负责编写；第六章、第七章、第八章和第九章由陈秀荣负责编写，第十章由王郁负责编写。全书由王郁、林逢凯统稿。

本书从低浓度水溶液系统的反应工程和分离工程角度撰写水污染控制工程，知识涉及面广，由于编著者的水平有限，对一些内容的领会、应用和表达未免有所失误或不妥之处，殷切期待读者的批评指正，在此深表感谢。

编著者

于上海，华东理工大学

2007年12月

目 录

第一章 总论	1	一、调节(均衡)的作用	49
第一节 天然水资源及其循环	1	二、调节过程反应器	50
一、水资源及其分布	1	三、调节池容积的设计计算	52
二、水的循环	1	第二节 隔滤与离心分离	53
第二节 水体污染	3	一、隔滤过程基本理论及设备	54
一、水体污染类别	3	二、离心分离过程基本理论及设备	64
二、废(污)水的水质特征	3	第三节 沉降(淀)	67
三、水体污染程度评价	7	一、固体颗粒的分类与沉降类型	67
第三节 水体污染控制	10	二、固体颗粒沉降动力学及过程分析	68
一、水体污染控制标准	11	三、沉淀池及其设计参数	73
二、水体污染控制过程	15	第四节 气浮	79
参考文献	16	一、气浮机理	80
思考题	16	二、气浮净水的分类	84
计算题	17	三、气浮处理系统分析及其设计	87
第二章 水污染控制工程的理论基础	18	第五节 隔油	91
第一节 反应过程动力学	18	一、含油废(污)水的来源、污染特征及	
一、化学反应速率	18	处理技术简介	91
二、化学反应类型	19	二、常用浮油处理过程及反应器	92
三、各类化学反应的反应速率描述	21	三、油污的脱水	95
四、反应速率常数与温度关系	25	四、乳化油及破乳	96
五、非基元反应动力学模式及机理探讨		参考文献	97
.....	26	思考题	97
第二节 物料衡算	28	计算题	98
一、物料衡算的若干概念	28	第四章 废(污)水化学处理过程	99
二、物料衡算的分析	29	第一节 中和	99
三、稳态流和非稳态流的物料衡算分析		一、中和过程机理	99
.....	30	二、中和过程设计与计算	100
第三节 反应器及其选择	31	三、中和过程反应器	103
一、反应器的类型及其特征	31	第二节 化学沉淀	105
二、反应器的水力学特性	36	一、化学沉淀过程机理	105
三、典型反应器的计算	43	二、化学沉淀过程化学计量学	106
四、反应器选择与反应器在系统中的		三、化学沉淀过程反应器	111
安排	45	第三节 混凝与絮凝	111
参考文献	47	一、胶体、胶体稳定性及其脱稳	112
思考题	47	二、凝聚动力学	114
计算题	47	三、混(絮)凝剂及其凝聚作用	116
第三章 废(污)水物理处理过程	49	四、混凝过程的影响因素	118
第一节 水量与水质的调节	49	五、混凝设备及其设计	120
		第四节 氧化还原	122

一、化学氧化还原过程的机理及影响因素	122
二、药剂氧化还原过程	124
三、高级氧化过程	137
四、电化学氧化还原过程	141
参考文献	144
思考题	144
计算题	145
第五章 废(污)水的物理化学处理过程	146
第一节 吸附	146
一、吸附的基本理论	146
二、吸附反应器及其工艺计算	154
三、吸附剂及其再生	162
四、吸附过程在废(污)水处理中的应用	166
第二节 离子交换	167
一、离子交换的基本理论	168
二、离子交换剂	173
三、离子交换操作工艺条件	177
四、离子交换反应器及其工艺过程	179
五、离子交换在废(污)水处理中的应用	181
第三节 膜分离	186
一、电渗析	187
二、反渗透	196
三、超滤	204
四、纳滤	206
第四节 萃取	209
一、萃取原理	210
二、萃取器及其操作流程	213
三、萃取剂	216
四、萃取过程在废水处理中的应用	217
五、液膜萃取及其应用	218
六、超临界流体萃取及其应用	222
第五节 吹脱与汽提	224
一、吹脱与汽提的基本原理	225
二、吹脱设备	225
三、汽提设备	227
四、吹脱与汽提在废水处理中的应用	229
参考文献	231
思考题	232
计算题	232
第六章 废(污)水生物处理基本原理	234

第一节 废(污)水生物处理基本原理	234
第二节 废(污)水生物处理微生物学原理	234
一、废(污)水生物处理中的微生物	235
二、微生物对污染物质的生物降解转化	243
三、废(污)水处理底物降解及微生物增殖动力学	250
第三节 废(污)水的可生物处理性	256
一、废(污)水的可生物处理性	256
二、评价废(污)水可生物降解性的方法	258
参考文献	260
思考题	261
计算题	261
第七章 活性污泥生物处理过程	262
第一节 活性污泥净化过程的基本原理	262
一、活性污泥处理过程的基本概念与类型	262
二、活性污泥的评价指标	263
三、活性污泥净化废(污)水的过程	265
第二节 活性污泥反应过程分析	269
一、完全混合式活性污泥系统动力学	269
二、推流式活性污泥系统动力学	273
第三节 好氧活性污泥处理过程	274
一、有机底物降解与需氧	274
二、曝气的基本理论和工程应用	275
三、好氧活性污泥处理工艺类型及设计	281
四、膜生物反应器	302
第四节 厌氧活性污泥处理过程	307
一、厌氧水解酸化处理过程	307
二、完全厌氧处理过程	309
第五节 厌氧-好氧活性污泥处理过程	326
一、氧化沟	326
二、序批式活性污泥处理过程	332
三、吸附-生物降解组合工艺	338
四、生物脱氮过程	341
五、生物除磷处理组合工艺	344
六、生物脱氮除磷组合工艺	347
参考文献	352
思考题	352
计算题	352
第八章 生物膜处理过程	354
第一节 生物膜处理过程的基本原理和	

特征	354	423
一、生物膜处理过程的基本原理	354	一、物化-生物过程组合工艺	423
二、生物膜处理过程的特征	359	二、化学-生物过程组合工艺	425
第二节 生物膜过程反应器	360	第三节 分解-生物过程组合工艺处理废	
一、生物滤池	361	(污)水	427
二、生物转盘	377	一、氧化过程预处理的生物组合工艺	427
三、生物流化床和厌氧膨胀床	380	二、还原过程预处理的生物组合工艺	431
四、接触氧化池	385	三、其他化学分解过程预处理的生物组合	
五、生物移动床	387	工艺	431
第三节 活性污泥-生物膜复合处理过程		第四节 废(污)水的后处理工艺	432
.....	388	一、生物-分解组合工艺	432
一、活性污泥过程和生物膜过程一体化		二、生物-物化组合工艺	435
复合工艺	388	三、生物-生物、物化结合的组合工艺	
二、活性污泥过程和生物膜过程多单元		437
组合工艺	389	第五节 废(污)水的深度处理工艺	438
参考文献	392	一、工业废水二级处理出水的深度处理	
思考题	392	代表性组合工艺	438
计算题	393	二、城市污水二级处理出水的深度处理的	
第九章 污泥处理与处置过程	394	代表性组合工艺	440
第一节 污泥分类、性质与输送	394	三、工业废水和生活污水混合的二级处理	
一、污泥的分类与性质	394	出水深度处理代表性组合工艺	444
二、污泥的输送	396	参考文献	445
第二节 污泥的处理过程	400	思考题	445
一、污泥的浓缩处理过程	401	第十一章 非点污染控制工程	447
二、污泥的消化处理过程	405	第一节 水体自净与修复	447
三、污泥干化过程和机械脱水过程	410	一、水体自净	447
四、污泥堆肥过程	416	二、纳污水体的溶解氧规律	450
五、污泥干燥和焚烧过程	417	三、污染水体的修复	456
第三节 污泥最终处置	418	第二节 污染水体的微生物修复	460
一、农田绿地利用	418	一、微生物修复作用的原理	460
二、建筑材料利用	418	二、生物修复的影响因素	461
三、污泥填埋处置	419	三、生物修复的微生物类别	464
四、污泥投海处置	419	四、生物修复的类型和实施	466
参考文献	419	五、水体生物修复中生物促进剂的应用	
思考题	420	468
计算题	420	第三节 水体生态修复技术	471
第十章 废(污)水处理的组合过程		一、水生植物修复技术	471
.....	421	二、生物操纵修复技术	473
第一节 废(污)水处理过程组合原则及		三、生物稳定塘修复技术	474
工艺流程	421	四、人工(自然)湿地修复技术	477
一、废(污)水处理过程组合原则	421	五、污水土地处理技术	479
二、废(污)水处理过程组合工艺流程		参考文献	481
.....	422	思考题	482
第二节 提取-生物组合工艺处理废(污)水		计算题	482

第一章 总 论

水是宝贵的自然资源，在地球上广为分布，各种自然因素和人为因素会使天然水体受到不同程度的污染。当今世界对水体污染问题十分重视，人们专门研究了保护水体、合理利用水资源的各种过程和方法，采取了应有的措施，包括利用法律手段控制水体污染，以保护水体洁净。

第一节 天然水资源及其循环

水是构成地球上一切生命体的基本要素，参与了生命形成及其物质、能量转化。人类活动所需的水来自于天然水体，而由此产生的废（污）水又排入水体，使其受到不同程度的污染。

一、水资源及其分布

水以气、液、固三种聚集状态存在于自然界，遍布于海洋、地面、地下、高山、大气、动植物及矿物内，几乎无所不在。水呈气态时存在于大气中为水蒸气；呈液态时存在于地面上的海洋、江河、湖泊、水库、沼泽等为地面水，存在于地下浅层和深层为地下水，以及动植物体内的水分和矿物结晶水；呈固态时为高山、南北两极的冰雪。地球上水的总量约为13.9亿立方千米，它的分配比例见表1-1，地球上水的分布见图1-1。可见地球上淡水所占总量的比例不到2.7%，可利用量不到1%，而全世界人类所赖以生存的也就是这百分之一的水，可见淡水资源是极为宝贵的。1993年联合国大会通过决议，确定每年的3月22日为“世界水日”，为全球水资源的日益短缺和不断增加的水污染敲响警钟。

表 1-1 水在地球上的分配

水体类别	体积/km ³	占总量的百分率/%	水体类别	体积/km ³	占总量的百分率/%		
海洋	1.35 × 10 ⁹	97.3	陆 地	土壤含水	70000	0.005	
大气	13000	0.001		地下水	8.3 × 10 ⁶	0.598	
陆	河流	1700		0.0001	冰川和冰帽	2.92 × 10 ⁷	2.10
	湖泊	125000		0.009	生物体内水	1100	0.0001
地	内海	105000		0.008	总计	1.388 × 10 ⁹	100

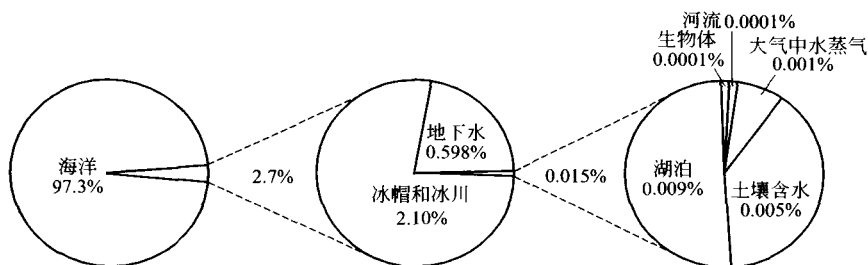


图 1-1 水在地球上的分配示意图

二、水的循环

地球上的水总是处于川流不息的循环运动中，由于自然因素造成水由蒸汽转化为液态，

又由液态转化为固态，反过来又相应地由固态转化为液态，进而转化为气态。这样水蒸气—水—冰（或雪）周而复始地循环运动，通过云气运动或大气环流、地面径流，地下渗流，冷凝、冷冻等过程构成水的自然界大循环。影响水自然循环的因素有太阳辐照、冷却、地球重力作用等。水的自然循环如图 1-2 所示。

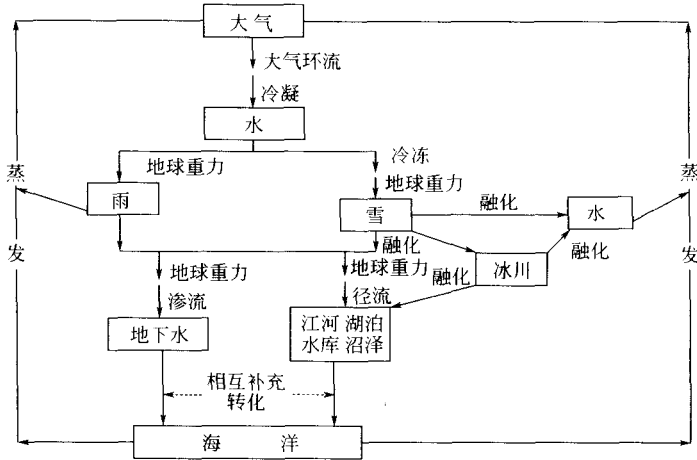


图 1-2 水的自然循环

由于社会生活和生产活动的需要，人类往往从天然水体中汲取大量的水，按其用途不同可分为生活用水和生产用水。在生活和生产活动过程中随时都有杂质混入，使水体受到不同程度的污染，构成了相应的生活污水和生产废水，随后又不断地排入天然水体中。这样由于人为因素，通过反复汲取和排放构成了水的社会循环，见图 1-3。

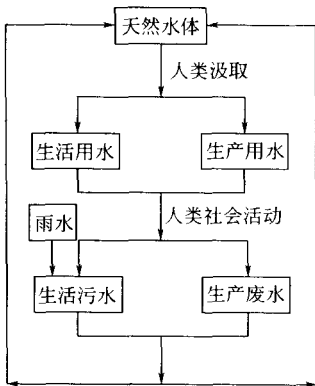


图 1-3 水的社会循环

在以上两个循环的每个环节中，或因自然因素，或因人为因素，致使水体受到不同程度的污染。特别在社会循环中，随着各国工农业生产的发展和用水标准的逐步提高，需水量迅速上升，生活污水和生产废水排放量也不断增加。如不妥善处理废（污）水而任意排入天然水体，水体污染将日益加剧，破坏原有自然生态环境，引起环境问题，以致造成公害。众所周知的 1885 年英国泰晤士河因河水水质污染造成水生生物绝迹；1955 年日本由镉引起中毒的“骨痛病”；1956 年汞中毒引起的水俣病等为极严重的公害事件。其他各国虽未发生如此严重的事件，但因污染造成的损失以及给人类健康带来的威胁亦是相当可观的。据美国环保局报道：

1960 年美国因水污染造成粮食损失达 10 亿美元，1960 年至 1970 年期间的统计数字显示全美因水污染而引起的死亡人数为 20 人。在 20 世纪 80 年代中期，美国的 39 个州有 $2.2 \times 10^4 \text{ km}$ 的河流、16 个州约有 $0.26 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的湖泊、8 个州有 $0.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的河口受到有毒污染物的影响。20 世纪 70 年代以来，尽管我国在水污染防治方面做出很大努力，但水污染的发展趋势仍未得到有效遏制。由于废（污）水处理率仅为 40%~50%，相当数量的废（污）水未经处理直接或间接排入水体，严重污染了水资源。2000 年全国水资源一级区废（污）水排放的调查统计也印证了上述状况，见表 1-2。2004 年中国环境状况公报显示：七大水系的 412 个水质监测断面中，I~Ⅲ类、Ⅳ~Ⅴ类和劣Ⅴ类水质的断面比例分别为 41.8%、30.3%和 27.9%，废水

排放量为 482.4 亿吨, 化学需氧量排放量为 1339.2 万吨, 氨氮排放量为 133.0 万吨, 全国有三分之二的湖泊水体存在不同程度富营养化。2005 年发生松花江水体的硝基苯污染事件, 造成沿流域城市停水数天; 2007 年太湖蓝藻爆发, 严重污染水质, 引起周边城市用水困难。可见虽经多年在废(污)水处理方面的努力, 我国废(污)水排放引起水体污染的状况并未得到彻底改观, 环境保护工作任重而道远。由此可见, 目前世界各地水体的原有化学、物理和生物特性都已不同程度地发生了变化, 水体污染已成为国际社会关注的重大环境问题。

表 1-2 2000 年水资源一级区点源废(污)水及化学需氧量和氨氮排放量

水资源一级区	废(污)水排放量/ $\times 10^8 \text{ m}^3$			COD 排放量/ $\times 10^4 \text{ t}$			氨氮排放量/ $\times 10^4 \text{ t}$		
	城镇生活	工业	合计	城镇生活	工业	合计	城镇生活	工业	合计
松花江区	11.2	23.1	34.3	59.9	49.7	109.6	7.7	2.5	10.2
辽河区	11.0	21.1	32.1	51.9	79.9	131.8	5.8	4.2	10.0
海河区	24.2	36.2	60.4	61.3	159.0	220.3	5.3	16.0	21.3
黄河区	13.3	29.1	42.4	36.4	99.3	135.7	4.0	9.1	13.1
淮河区	19.3	44.9	64.2	56.9	156.6	213.5	5.9	22.0	27.9
长江区(其中太湖流域)	82.6 (20.9)	215.9 (32.3)	298.5 (53.2)	185.4 (66.5)	362.0 (49.7)	547.4 (116.2)	20.1 (6.5)	39.5 (3.5)	59.6 (10.0)
东南诸河	13.5	36.8	50.3	42.0	55.3	97.3	4.7	2.9	7.6
珠江区	48.9	95.6	144.5	118.9	249.5	368.4	10.6	9.7	20.3
西南诸河区	1.7	2.1	3.8	2.3	3.6	5.9	0.2	0.4	0.6
西北诸河区	4.0	5.4	9.4	11.8	18.8	30.6	0.8	1.5	2.3
全国	230	510	740	627	1234	1861	65	108	173

第二节 水体污染

人类活动引起的水体污染形式、种类繁多, 究其本质是某些物质或能量因子负荷的过度集中, 破坏了水体原有的洁净程度, 致使水体的使用价值降低、甚至丧失。全面、客观地评价水体污染状况, 有助于合理、充分地利用水资源, 以保障人类的健康, 促进社会和谐, 可持续发展。

一、水体污染类别

水体受污染方式各式各样, 基本可分为两大类: 点污染和非点污染。

由人类社会活动产生的生活污水和生产废水称为点污染。形成的生活污水和生产废水排入天然水体引起的污染称为非点污染。有时把大气污染后形成的酸雨也归属于非点污染范畴, 但一般归置于大气污染范畴内加以讨论。

污染后的水特别是丧失了使用价值后的水统称为废水。在实际应用过程中往往将人们生活过程中产生和排出的废水称为生活污水, 主要包括粪便水、洗涤水、冲洗水; 又将工农业各类生产过程中产生的废水称为生产废水。废水又可根据不同的分类, 称谓很多, 也较复杂。例如根据污染物的化学类别称有机废水和无机废水, 前者主要含有机污染物, 大多数具有生物降解性; 而后者主要含无机污染物, 一般不具生物降解性。又如根据所含毒物的种类不同, 可把废水称为含酚废水、含氰废水、含油废水、含汞废水、含铬废水等。此外还可根据生产废水的部门或生产工艺来划分, 如焦化废水、农药废水、杀虫剂废水、洗涤剂废水、食品加工废水、电镀废水、冷却水等。

二、废(污)水的水质特征

所谓水质就是水和其中杂质所共同表现出来的综合特性。生活污水的水质由生活废料、

人体排泄物、含大气污染物的雨水和水共同表现出来的综合特性，其数量、成分、污染物浓度等与居民的生活习惯、用水量、降雨量等有关，生活污水一般不含有毒物质，具有适合于微生物繁殖的条件，因此含有大量的病原体和细菌。

表 1-3、表 1-4 和表 1-5 列举了几则国内外生活污水的水质资料，其中主要的两项污染指标是悬浮物和生化需氧量（BOD₅）。

表 1-3 我国生活污水水质

项 目	北 京	上 海	西 安	武 汉
悬浮物/(mg/L)	50~327	320	—	66~330
耗氧量/(mg/L)	30~88	—	—	52~64
BOD ₅ /(mg/L)	90~180	360	—	320~338
氨氮/(mg/L)	25~45	47	22~33	15~60
氯化物/(mg/L)	124~128	142	80~100	—
磷/(mg/L)	30~35	—	—	—
钾/(mg/L)	18~22	—	—	—
pH 值	7.35~7.7	7.31	7.30~7.85	7.1~7.6
污泥容量/%	0.83~1.56	—	1.48~1.55	0.2

表 1-4 美国生活污水水质/(mg/L)

项 目	高浓度	中等浓度	低浓度	项 目	高浓度	中等浓度	低浓度
总固体	1200	720	350	有机氮	35	15	8
挥发性	325	200	105	游离氨	50	25	12
固定性	525	300	145	亚硝酸盐	0	0	0
悬浮物	350	220	100	硝酸盐	0	0	0
挥发性	275	165	80	总磷(P)	15	8	4
固定性	75	55	20	有机磷	5	3	1
沉降性固体	20	10	5	无机磷	10	5	3
BOD ₅ (20℃)	400	200	110	氯化物	100	50	30
TOC	290	160	80	碱度(CaCO ₃)	200	100	50
COD _{Cr}	1000	500	250	油脂	150	100	50
总氮(N)	85	40	20				

表 1-5 前苏联生活污水水质

项 目	每人每日污 物量/g	浓度/(mg/L)	项 目	每人每日污 物量/g	浓度/(mg/L)
悬浮物	35~50	150~800	耗氧量(O ₂)	5~7	20~120
氨氮(N)	7~8	30~130	BOD ₂₀	30~50	600~1000[用水量 50L/(d·人)]
氯化物(Cl)	8~9	30~150			300~500[用水量 100L/(d·人)]
磷酸盐(P ₂ O ₅)	1.5~1.8	6~30			150~250[用水量 200L/(d·人)]
钾(K ₂ O)	3	—			

生产废水则是由各类生产活动产生的，由于生产类型繁多，因此生产废水的特征是水量差别悬殊、水质成分复杂。农业废水主要在使用农药、除草剂、化肥时形成，以有机物为主，也有无机物。工业废水所含的污染物种类繁多，概括起来分为以下几种。

1. 固体污染物

固体物质在水中有三种存在状态：溶解态、胶体态和悬浮态。这与固体的颗粒大小有关，各种固体物质颗粒大小与在水中分散状态见表 1-6。生活污水和不同生产废水中悬浮物（悬浮固体）含量见图 1-4。

表 1-6 水中固体物质表

杂质名称	颗粒直径/m	观察工具	运动特点	分散状态
原子、无机离子、较小分子有机物	10^{-10} (0.1nm)	清澈无物	自由运动	溶解态
染料, 颜料	10^{-9} (1nm)	电子显微镜 超微显微镜 显微镜	布朗运动	胶体态
腐殖酸, 表面活性剂	10^{-8} (10nm)			
病毒	10^{-7} (100nm)			
部分细菌	10^{-6} ($1\mu\text{m}$)			
部分细菌, 蛋白质, 黏土	10^{-5} ($10\mu\text{m}$)			
细砂浆, 纤维素	10^{-4} ($100\mu\text{m}$)	肉眼可见	重力沉降	悬(漂)浮态
粗砂浆	10^{-3} (1mm)			
粗砂浆	10^{-2} (1cm)			
碎石块	10^{-1} (10cm)			

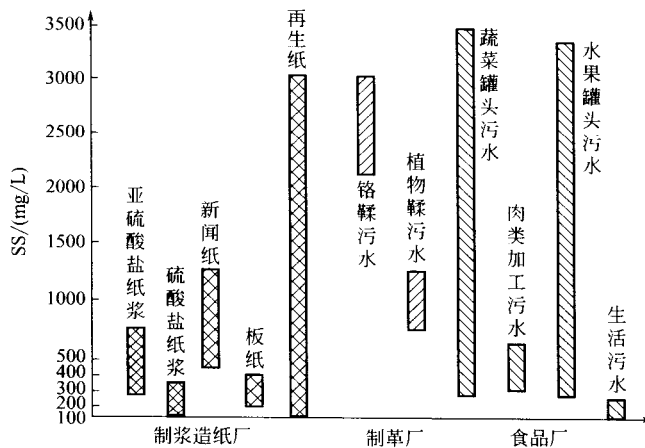


图 1-4 废(污)水中悬浮物含量

2. 有机污染物

工业废水中含有大量不同类别的合成有机物分子, 其结构既可以很简单, 也可以很复杂, 如蛋白质、油类、染料、苯酚、苯胺、多氯联苯、硝基化合物等。从其被微生物分解的能力来看, 可分成生物可降解的和生物难降解或不能降解的。

3. 有毒污染物

工业废水中有时会存在对微生物或其他生物引起毒性反应的污染物质, 目前工业上使用的有毒物质已超过 12000 种, 有致癌、致突变、致畸和致死等毒性作用, 它可分无机和有机两大类:

- ① 无机毒物 主要有重金属离子、氰化物、氟化物和亚硝酸盐。
- ② 有机毒物 同有机污染物。

4. 无机污染物

主要有无机酸和无机碱, 可溶性氯化物、氨及其化合物、磷化合物、硫化物、重金属及其化合物等。

5. 引起臭和色的污染物

这类引起废水高臭味和高色度的物质也可划分为有机和无机污染物, 如氨、胺、硫化

氢、有机硫化物、粪臭素等会引起废水恶臭。某些金属离子或金属化合物、有机染料、炭黑等会造成废水有异色。

6. 放射性污染物

产生 α 、 β 、 γ 射线引起污染的物质为放射性污染物。

7. 热污染

由高温废水引起的危害称热污染。

8. 生物污染物

在水中存在的微生物可分为两大类：植物和动物。植物型又可分为藻类（内含叶绿素）和菌类（一般不含叶绿素）两种，菌类分为真菌和细菌，如单细胞的酵母菌和多细胞的毒菌均属真菌类，同样细菌中亦有单细胞和多细胞之分。动物型分为单细胞的原生动物和多细胞的微型动物，如轮虫、线虫、甲壳虫等。引起水体污染的微生物主要是致病细菌和病毒，当然藻类过多地繁殖会造成水体富营养化。

上述讨论的工业废水中的污染物及其来源综合于表 1-7 中。

表 1-7 工业废水中的主要污染物及其来源

污 染 物	主 要 来 源
游离氯	氯碱厂、造纸厂、石油化工厂、漂洗车间
氨及铵盐	煤气厂、氮肥厂、化工厂、炼焦厂
镉及其化合物	颜料厂、石油化工厂、有色金属冶炼厂
铅及其化合物	颜料厂、冶炼厂、蓄电池厂、烷基铅厂、制革厂
砷及其化合物	农药使用过程、农药厂、氮肥厂、制药厂、皮毛厂、染料厂
汞及其化合物	氯碱厂、氯乙烯、乙醛等的石油化工厂、农药厂、炸药厂、采矿山
铬及其化合物	颜料厂、石油化工厂、铁合金厂、皮革厂、制药厂、陶瓷、玻璃厂、电镀厂
酸类	三酸工业、石油化工厂、合成材料厂、矿山、钢铁厂、金属酸洗车间、电镀厂、染料厂
氟化物	磷肥厂、氟化盐厂、塑料厂、玻璃制品制造厂
氰化物	煤气厂、丙烯腈生产厂、有机玻璃厂、黄血盐生产厂、电镀厂
苯酚及其他酚类	煤气厂、石油裂解厂、合成苯酚厂、合成染料厂、合成纤维厂、酚醛塑料厂、合成树脂厂、制药厂、农药厂
有机氯化物	农药厂、农药使用过程、塑料厂
有机磷化物	农药厂、农药使用过程
醛类	合成树脂厂、青霉素药厂、合成橡胶厂、合成纤维厂
硫化物	硫化染料厂、煤气厂、石油化工厂
硝基及氨基化合物	化工厂、染料厂、炸药厂、石油化工厂
油类	石油化工厂、纺织厂、食品厂
铜化合物	石油化工厂、试剂厂、矿山
放射性物质	原子能工业、放射性同位素实验室、医院
热污染	工矿企业的冷却水、发电厂
生物污染物	制药厂、屠宰厂、医院、疗养院、生物研究所、天然水体、阴沟
碱类	氯碱厂、纯碱厂、石油化工厂、化纤厂

表 1-8 综合了一些工业废水的主要化学组成。

表 1-8 某些工业废水的主要化学组成/(mg/L)

废水来源	pH	NH ₃ -N	COD _{Cr}	BOD ₅	悬浮物	油或砷	酚	氰化物	硫化物
石油加工厂	7~8			200~ 250	50~ 250	油 300~ 41500			100~200
油页岩厂	7.5~ 8.5	1780~ 1840	5700~ 7000		60~ 1500	油 200~ 1430	200~ 260	0.2~0.9	450~500
煤气厂	6~9	2000~ 3000			200~ 400		500~ 700	15~30	50~100
焦化厂	8~9	1634~ 1968	5245~ 7778	1420~ 2070	46~58		930~ 1690	1.5~3.0	5.4

续表

废水来源	pH	NH ₃ -N	COD _{Cr}	BOD ₅	悬浮物	油或砷	酚	氰化物	硫化物
制革厂	6~12			220~ 2250	70~ 13700				
造纸厂	8.8~ 10.2	0.5~ 2.1	2077~ 2767		634~ 1528				
印染厂	9~12	7.7	1100	350	145				7.4
化纤酸性废水	2.2		108	50	63				
化纤碱性废水	12.5		211	180	107				
氮肥厂	6.5~7.5				200~320	砷 0.1~0.8			
屠宰厂	7.8	90		1707					

三、水体污染程度评价

由于水和杂质表现出来的综合特性形成了不同的水的质量，简称水质。水质的好坏实质是衡量水体污染程度的衡量，下面用水质指标分别对水体的点污染和非点污染进行评价讨论。

(一) 水体的点污染评价指标

点污染产生的废（污）水水质可用多个单项指标衡量。

1. 总固体 (TS, Total Solid)

总固体是衡量废（污）水中固体污染物的多少的指标，水质分析中习惯于把固体颗粒能透过 3~10 μ m 过滤膜的固体称为溶解性固体 (DS, Dissolved Solid)，不能透过的称悬浮固体 (SS, Suspended Solid)，由此可知 TS=DS+SS。悬浮固体还可用另一个指标——浊度来衡量。由于悬浮固体在水体中作布朗运动，不能自由沉降下去，致使水体混浊。通过混浊水体对光的散射或透射程度不同来测定其混浊程度，所得指标即为浊度。

2. 臭味

采用感观测量法 (MDTOC, Minimum Detectable Threshold Odor Concentration)。用一系列洁净水稀释有臭味的废（污）水样品来进行鉴别，求出最小可鉴出的臭味浓度倍数。

3. 色度

用标准液和废（污）水相比较的方法。废（污）水中的色泽有真色度和表观色度两种。由溶解在废（污）水中的污染物所产生的色泽（即去除浊度后）称为真色度；由包括废（污）水中悬浮物和胶体产生的色泽（即未去除浊度）称为表观色度。

4. 酸、碱度或 pH

用中和滴定法测定酸、碱度，或用 pH 计直接测定废（污）水的 pH 值更为简单。

5. 温度

用温度计测量之。

6. 毒性

通常可用 LD₅₀ 表示使实验动物的 50% 致死的毒性物剂量和 LC₅₀ 表示使实验动物的 50% 致死的毒物浓度来描述毒物的毒性。可见 LD₅₀ 和 LC₅₀ 值越小，其毒性越大。一般毒物的毒性可分为五级：无毒、低毒、中毒、高毒和剧毒。毒物对生物的效应有急性中毒和慢性中毒两种，急性中毒的初期效应十分明显，严重时会导致死亡；慢性中毒的初期效应不很明显，但长期积累会引起突变，致畸、致癌，最终死亡。废（污）水中毒物的毒性采用生物试验法测定，通常用鱼和原生动进行试验。常见的具有致突变作用的化学物质有亚硝酸胺类、苯并[a]芘、甲醛、苯、烷基汞化合物、甲基对硫磷、敌敌畏、百草枯、黄曲霉素 B₁ 等。反应

停、甲基汞等则是声名狼藉的致畸物质。目前确认对人类有致癌作用的化学物质有 20 多种，如苯并 [a] 芘、二甲基亚硝胺、2-萘胺、砷及其化合物、石棉等。

大多数环境污染物质是毒物，在进入生物机体后使体液和组织发生生物化学的变化，干扰或破坏机体的正常生理功能，并引起暂时性或持久性的病理损害甚至危及生命。持久性有机污染物 (Persistent Organic Pollutants, POPs) 和重金属及其化合物受到人们的特别关注。联合国于 1997 年通过决议，致力减少持久性有机污染物 POPs 的排放，并进一步禁用。经过国际社会的共同努力，2001 年 5 月 23 日，127 个国家在瑞典签署了《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》(亦称《POPs 公约》)，并于 2004 年 5 月 17 日正式生效，我国也于 2004 年 11 月 1 日批准生效。该公约中提出了需要采取国际行动的首批 12 种(类)物质，即艾氏剂、狄氏剂、异狄氏剂、滴滴涕、氯丹、六氯苯、灭蚁灵、毒杀芬、七氯、多氯联苯、多氯代二苯二噁英(简称“二噁英”，PCDDs)和多氯代二苯并呋喃(简称“呋喃”，PCDFs)。其中前 9 种属农药，多氯联苯是精细化工产品，后两种是化学品生产的杂质衍生物和含氯废物焚烧所产生的次生污染物。2006 年 11 月，又将五氯苯添入其列。

7. 生化需氧量 (BOD, Biochemical Oxygen Demand)

它是表征废(污)水中多种有机物存在的综合指标，间接地表示了有机物的含量。

BOD 是指废(污)水中的有机物被微生物氧化分解时所需要的氧量。必须指出的是，有机物的生物氧化分解过程很长，而且具有明显的阶段性，在第一阶段，有机物在好氧微生物的作用下被降解并转化为 CO_2 、 H_2O 及 NH_3 ，第二阶段，氨转化为亚硝酸盐进而氧化为硝酸盐，这个过程称为硝化，两个阶段的耗氧情况见图 1-5。

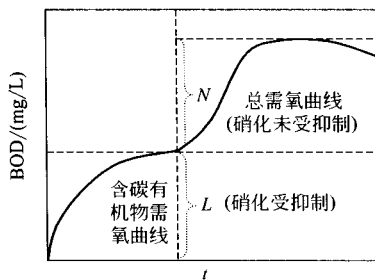


图 1-5 BOD 变化曲线

生物氧化是一个缓慢的过程，需无限长的时间才能使其反应完全。就第一阶段而言，在 10~20 日内接近完成，而第二阶段大致需要百日才能最终完成，显然用这么长的时间来测定是不现实的。试验表明，经 20 天时间的分解，C、H、N 的氧化程度达 95%~99%；经 5 天时间的分解，有机物中 C、H 氧化程度达 60%~70%。

而 20 天的分解时间，对 BOD 的测定仍为时过长，难于指导生产实践，所以一般采用 5 天的测定时间，即 BOD_5 。它是表示在 20℃ 温度下，废(污)水经细菌培养 5 天所消耗氧的数量。可见 BOD_5 值越高，水中能被细菌分解的有机污染物越多。但若废(污)水中有不能被微生物降解的有机物存在，则 BOD_5 就不能反映出这些有机污染物。各种废(污)水的生化需氧量见表 1-9。

表 1-9 各种废(污)水的生化需氧量/(mg/L)

废 水 来 源		生化需氧量	废 水 来 源		生化需氧量
制浆造纸厂	亚硫酸盐纸浆	100~750	制革厂	铬鞣污水	650~2000
	硫酸盐纸浆	100~500		食品厂	植物鞣污水
	新闻纸浆	100~150	肉类加工		650~4000
	板纸	100~200	水果罐头		100~4800
	再生纸	150~900	蔬菜罐头	100~6800	
人造纤维厂	人造短纤维	150~650	鱼肉罐头	1000~3500	
	毛纺洗毛	5000~5600	药厂	青霉素	3550~4500
制革厂	水浸污水	900~1400	生活污水		100~400
	浸灰污水	2500~3000			

8. 化学需氧量 (COD, Chemical Oxygen Demand)

它是表示废(污)水有机物和无机物在强氧化剂作用下,氧化过程所需的氧量。目前常用的是重铬酸钾法。由于强氧化剂的氧化能力比微生物的氧化能力强得多,为此 $COD > BOD_{20} > BOD_5$ 。因此 COD 值包括了废(污)水中不被细菌分解的那部分有机物及无机物的量。对于特定的废(污)水 COD 值与 BOD 值之间存在着一定的关系,对测定过程缓慢的 BOD 值可起到代替作用,用于水处理操作和过程控制中。

9. 化学耗氧量 (OC, Oxygen Consumed)

它是表示废(污)水中有有机物在 K_2MnO_4 的作用下,氧化过程所需的氧量,又称高锰酸盐指数。该氧化过程往往随化合物的种类不同有很大的变化,且所得 OC 值往往小于 BOD_5 ,为此 OC 值一般不能代表废(污)水中的全部可氧化污染物。

10. 总有机碳 (TOC, Total Organic Carbon)

它是指废(污)水中全部有机物中碳的含量,它特别适用于低浓度废(污)水,是测定废(污)水中有有机物含量的重要方法之一。由于测定过程是在催化剂作用下的高温氧化,因此可以说有机物的氧化过程是完全的,该值对废(污)水中有有机物的总量有很好的代表性和可靠性。

11. 总需氧量 (TOD, Total Oxygen Demand)

它是借仪器分析的方法测定废(污)水中所有可氧化的有机物和无机物在强氧化过程中总的需氧量。对特定废(污)水, TOD 和 COD 或 BOD 存在着一定的关系,是一个比较有效的废(污)水的污染物衡量指标。

12. 油脂

它是油、脂肪、蜡和高分子量脂肪酸的总称。除浮油外,其余的均可包含在 COD、BOD、TOD 等几项指标中。这里浮油的量往往指如原油、汽油、润滑油、食用油等。

13. 氨氮 (NH_3-N) 和总氮

氨氮主要指以氨离子或游离氨形式存在的氮的测定,而总氮测定还包括有机氮、硝酸盐中的氮。这两个指标表示了废(污)水中含 NH_4^+ 和 NH_3 的量及总的氮量,对其处理方法选用有指导作用。

14. 各类无机物

各类无机物如磷、可溶性氯化物、硫及各类重金属均作为废(污)水水质指标进行测定。

(二) 水体非点污染的评价方法类型

自然界的水体在接受了生活污水和各种生产废水的排放后就成为含有各种化合物的复杂水溶液,对这种复杂水溶液不能简单地用单个指标评判,必须对其进行综合性评价。目前通过划分等级,以表示其污染程度,一般可分为严重污染、重污染、中等污染,轻污染和清洁水五个等级。

评价的方法有三大类。

1. 感观性的评价

主要依靠人们感觉粗略地描述水体质量,如在点污染指标中的色度、浊度、温度等,一般不必用仪器测定,这对城市中的水体及风景区的水体尤为重要。为此,感观性评价应用范围不广,但有一定的重要性。

2. 化学指标和生物指标的评价

单项指标和多项指标分级评价,这在农田灌溉,渔业用水中应用较多。

3. 综合性数学模式的评价

自 20 世纪 60 年代中期以来,国外逐渐发展了一种新型的综合性水质评价方法,即综合

性数学模式评价法。这种方法是使各种污染物和污染源建立在同一尺度上加以衡量、计算和比较,我国在20世纪70年代后期也开始进行这种研究。常用的方法有叠加型、均值型和均方根值三种,现分别介绍如下。

(1) 叠加型

① 综合污染指数 它是用以表示各种污染物对水体综合污染程度的一种数量指标,其计算模式如下:

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{C_K}{C_{oi}} \cdot C_i \quad (1-1)$$

式中 C_K ——根据具体条件规定的水体中各种污染物的统一最高允许标准;

C_{oi} ——各种污染物在水体中的最高允许浓度或标准值;

C_i ——各种污染物在水体中的实测浓度。

对不同的水体可选用不同的 C_K 值,计算后得到 K 值,然后依照 K 值的大小比较水体污染的程度, K 值越大,污染越严重。

② 水质质量系数 20世纪80年代,上海地区水质质量调查协作组提出的黄浦江“有机污染综合评价公式”就是水质质量系数的一项具体应用。其公式如下:

$$A = E_{BOD} + E_{COD} + E_{NH_3-N} - E_{DO} \quad (1-2)$$

式中, E 为各项指标的实测浓度与在水中的最高允许浓度之比值。

E_{BOD} 、 E_{COD} 、 E_{NH_3-N} 均大于1,而 $E_{DO} < 1$,则在 $A \geq 2$ 时,说明水体开始污染了, A 值越大,水质越差。

(2) 均值型 它是各项分指数总的平均值,计算模式如下:

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (1-3)$$

式中, a_i 为分指数。

$$a_i = \frac{S_i - C_i}{S_i - B_i} \quad (1-4)$$

式中 S_i ——各指标的最高允许浓度或称标准值;

C_i ——各指标的实测值;

B_i ——各指标的本底值。

因为 $B_i \leq S_i$,故 $S_i - B_i \geq 0$,如果 $C_i \gg S_i$,即污染物浓度超过了最高限值,则 $a_i \rightarrow -\infty$,由此可见 I 值越小,污染越严重,相反 $C_i = S_i$ 时,则 $a_i = 0$,水体为不污染。

(3) 均方根值型 这是一种采用均方根值的衡量指数。从误差的观点来看,这种计算方法表明的水体污染程度更具有代表性。计算模式为:

$$PI = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{\max}^2 + \left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{\text{avg}}^2} \quad (1-5)$$

式中 C_i ——各种指标的实测值;

L_{ij} ——各种污染物在不同水质用途时所确定的不同标准值。

当 $C_i = L_{ij}$ 时, $PI = 0.7$,因此在 $PI > 0.7$ 时,水体开始污染, PI 值越大,污染越严重。

第三节 水体污染控制

水体受废物(废水)污染后造成严重的环境问题,为保护水体环境,必须对水体的污染严加控制,制订水体卫生防护标准就是控制废水排放时的污染物种类和数量的有效措施。对