

水工艺处理技术与设计

韩剑宏 主编

于衍真 邱立平 副主编



化学工业出版社

·北京·

本书针对我国水资源缺乏、水污染严重的形势，从可持续发展的角度出发，分析和探讨了城镇废水处理方法、处理工艺设计及方案选择等若干问题。

全书共分三篇，分别介绍了水资源的特性、污染控制、水处理技术及相应的设计。本书在材料的收集和整理中，注意融合新技术的发展方向，有针对性地逐章分述；在写作上则尽量从设计者的角度出发，因而具有更强的综合性、目的性、系统性和实用性。

本书可供从事废水处理及其资源化的工程技术人员、科研设计人员、管理人员阅读使用，也可供高等院校给水排水、环境工程专业的师生学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

水工艺处理技术与设计/韩剑宏主编. —北京: 化学工业出版社, 2007.9

ISBN 978-7-122-01086-5

I. 水… II. 韩… III. 水处理 IV. TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 135857 号

责任编辑: 董琳 邹宁

责任校对: 凌亚男

装帧设计: 张辉

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: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订: 三河市延风装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 415 千字 2007 年 9 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

我国是世界上人均占有水资源较少的国家，而且水资源分布极不均匀，人均年占有量仅相当于世界平均值的 1/4。随着经济的发展，工农业及居民生活用水量的需求也在不断增大，污水量也急剧增多，加剧了我国水资源紧张的局面。

污水处理及其资源化是解决水资源严重不足、环境污染的有效措施。本书结合我国水处理工艺的实际情况，在介绍基础理论和技术的基础上，总结和汇编了水工艺中新的处理手段，分章、节说明了水处理单元的原理、分类、适用范围和条件，阐明了新技术、新方法、新设备、技术发展方向及前沿研究。在介绍基础理论和技术的基础上，本书还总结和汇编了一些典型的新的处理工艺，文字深入浅出，内容丰富，具有很强的可操作性。

本书由内蒙古科技大学韩剑宏教授（第二篇第六章），济南大学于衍真教授、邱立平博士（第一篇），北京科技大学李天昕博士（第二篇第三章），内蒙古科技大学甄树聪（每章设计实例，第二篇第四章），内蒙古科技大学张凯（第三篇第八章）、李卫平（第二篇第五章、第七章），河北省环境科学研究院孙京敏博士（第三篇第九章），包头钢铁公司的林庚博士（第二篇第一章）编写。图表由胡彩霞、刘海亮、班娜完成，韩剑宏统编。内蒙古科技大学的陈义胜教授、刘中兴教授、延克军教授、于玲红博士、陈莉荣副教授、山东农业大学的赵星明教授对本书也提出了宝贵意见。

本书注重吸收同行新的研究成果，以使读者能够跟踪、运用水处理的先进技术及工程方法。遵循少而精的原则，力求层次分明、重点突出、概念清晰、注重实用。

因编写人员学术水平和经验有限，加之时间仓促，书中缺点和疏漏之处在所难免，敬请读者、同行批评指正。

编 者

2007 年 2 月 18 日

目 录

第一篇 总论	1
第一章 水环境的污染与防治	1
第一节 水资源	1
第二节 水污染	3
第三节 水体污染防治及污染物总量控制	4
第二章 水污染与自净	6
第一节 废水	6
第二节 污染物与污染指标	6
第三节 废水水质与控制标准	12
第四节 控制废水污染的基本途径	14
第五节 水体自净	15
第六节 废水处理系统	18
第二篇 城市污水处理	21
第三章 物理处理技术	21
第一节 格栅	21
第二节 沉砂池	25
第三节 沉淀	27
第四章 活性污泥法	42
第一节 活性污泥法基本原理	42
第二节 活性污泥净化反应影响因素与主要设计、运行参数	45
第三节 反应动力学基础	50
第四节 运行方式与工艺参数	52
第五节 氧化沟	55
第六节 厌氧好氧交替法	61
第七节 吸附-生物降解法	63
第八节 间歇式活性污泥法	66
第九节 曝气的理论基础	78
第十节 曝气系统与空气扩散装置	80
第十一节 活性污泥反应器	82
第十二节 工艺设计	84
第十三节 系统的维护管理	94
第五章 生物膜法	98
第一节 概述	98
第二节 生物滤池	100
第三节 生物转盘	109
第四节 接触氧化法	112
第五节 生物流化床	114

第六章 厌氧处理技术	120
第一节 厌氧消化池	120
第二节 UASB	128
第三节 厌氧滤池	131
第四节 厌氧反应器的新发展	133
第五节 污泥处理	138
第七章 污水的生物脱氮除磷	152
第一节 概述	152
第二节 废水生物脱氮工艺流程	154
第三节 废水生物除磷技术特征	158
第四节 废水生物脱氮除磷工艺	162
第五节 废水生物脱氮新工艺	170
第三篇 深度处理与水厂设计	180
第八章 深度处理方法与回用	180
第一节 混凝沉淀	180
第二节 过滤	189
第三节 活性炭吸附	196
第四节 臭氧氧化	202
第五节 膜法	204
第六节 微波技术	219
第七节 消毒	223
第九章 处理厂设计	235
第一节 处理厂工艺流程及总体布置	235
第二节 厂内排水及给水设计	241
第三节 配水及计量设备	242
第四节 废水泵房	244
参考文献	246

第一篇 总 论

第一章 水环境的污染与防治

第一节 水 资 源

存在于地球上的气态、液态和固态的水，构成了自然地理环境的重要组成部分——水圈和水环境。

水是分布最广而又十分重要的自然资源。水资源是指可直接被人类利用、能不断更新的天然淡水，主要指陆地上的地表水和地下水的浅层部分。一般情况下，与人类生活和生产密切相关的生活用水、工业用水、农业用水不能大规模取用海洋咸水，只能取用淡水。

水圈（Watershed）包括水的自然圈（地下 1000m，地上 10km）和水的社会圈（人类活动范围）。地球上的水经常处于循环中，包括自然循环和社会循环。由自然力促成的循环称为水的自然循环（Hydrological cycle），它是水的基本运动方式。海水蒸发为云，随气流迁移到内陆，遇冷气流凝为雨雪而降落，称为降水。一部分水沿地表流动，汇成江河湖泊，称为地表径流；另一部分降水渗入地下，形成地下径流。在流动过程中，地表水和地下水相互补给，最终复归大海。这种海洋→内陆→海洋的循环，称为大循环。那些在小的自然地理区域内的循环，称为小循环。生物体内的水，也进行着吸收→蒸发→吸收的内外循环。自然循环的模式如图 1-1 所示。

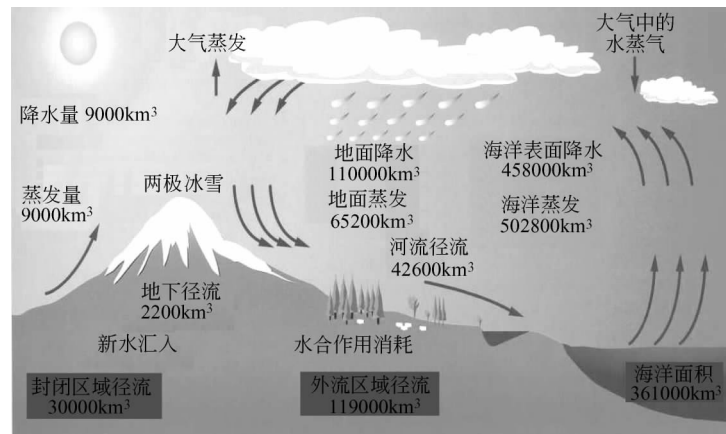


图 1-1 水的自然循环模式

地球上的水约有 $1.36 \times 10^{18} \text{ m}^3$ ，覆盖着近 3/4 的地球表面。评价水资源是否丰富，可以用径流量的利用率作为标准。径流量被利用的百分比越小，说明水资源越丰富，人们认为径流利用率不足 10% 的地域淡水资源丰富；径流利用率在 10%~20% 间的地域为淡水资源不足；径流利用率超过 20% 的地域淡水资源严重不足。

地球上的水也在不停地循环运动，进行相互之间的补给。水环境中的淡水资源很少，仅占总水量的 2.53%，而目前能供人类直接取用的淡水资源仅占水资源总量的 0.22%，加之自然水源的季节变化和地区差异以及自然水体遭到的普遍污染，致使可供直接取用的优质水量日显短缺，难以满足人们生活和工农业生产日益增长的需求。

从这个角度上看，水又是十分短缺的自然资源，就我国而言，淡水资源人均年拥有量不过 2545m³，不到世界人均值的 1/4，按国际上一般人口的标准，人均年拥有水量在 2000~10000m³ 时，将出现干旱季节的用水现象；人均年拥有水量在 1000~2000m³ 时，会出现缺水现象；少于 1000m³ 时，将出现严重缺水的水荒局面。在我国 300 多个大中城市中有 180 个城市缺水，其中 50 多个城市严重缺水。我国水资源的地区分布不均匀，北方和西北地区出现了资源性缺水；水资源的时间分布不均匀，加剧了水资源格局的时续不均衡性。

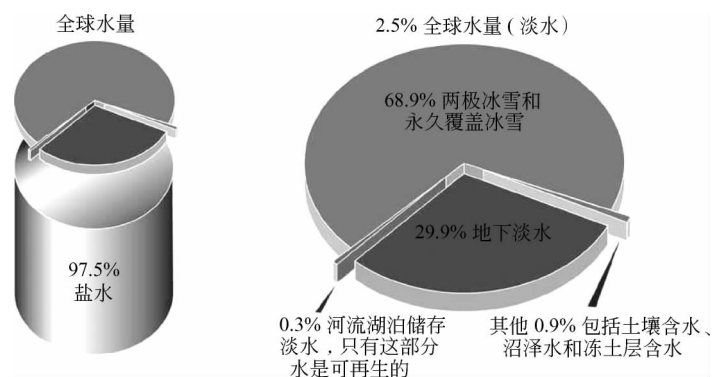


图 1-2 全球水资源分布图

对图 1-2 的分析表明：水资源是有限和可再生的，但自然再生的周期很长，见表 1-1。水循环的特征表现为水量平衡，即 $\sum Q_{in} = \sum Q_{out}$ ，解决水资源短缺的主要途径之一就是人工再生。

表 1-1 水的自然再生周期表

水圈 (Water of Hydrosphere)	再生周期	水圈 (Water of Hydrosphere)	再生周期
世界海洋 (World Ocean)	2500 年	沼泽含水 (Bogs)	5 年
地下水 (Ground water)	1400 年	土壤含水 (Soil moisture)	1 年
两极冰雪 (Polar ice)	9700 年	海峡网络 (Channel network)	16 天
冰川 (Mountain glaciers)	1600 年	大气含水 (Atmospheric moisture)	8 天
冻土层含水 (Ground ice of the permafrost zone)	10000 年	生物含水 (Biological water)	几小时
湖泊 (Lakes)	17 年		

由人的社会需要而促成的循环称为水的社会循环。它是直接为人们的生活和生产服务的。取之自然而直接供生活和生产（特别是工业生产）使用的水，称为给水；使用后因丧失其原有使用价值而废弃外排的水，称为废水。为保证给水能满足用户的使用要求（水量、水质和水压）而采取的整套工程设施，称为给水工程。为保证废水（有时也包括部分雨水）能安全排放或再用而采取的整套工程设施，称为排水工程。给水工程和排水工程构成了水的社会循环，完善的给水系统和排水系统是现代城市和工业区所必须具备的基础条件。图 1-3 反映了社会循环对自然循环的影响。

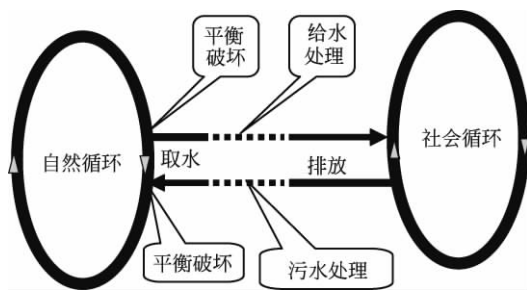


图 1-3 社会循环与自然循环的关系

第二节 水 污 染

在自然循环中，由非污染环境进入水中的化学物质，称为自然杂质或本底杂质；由污染环境进入水中的化学物质，称为污染物。进入水体（地面径流和地下径流）中的污染物数量超过了水体自净能力或纳污能力，而使水体丧失规定的使用价值的现象，称为水体污染或水污染。

污染分为点源污染（Point Source Pollution）和面源（Nonpoint Source Pollution）污染，前者是自特定地点如管线或放流口排出的污染负荷；后者是在一相当大面积的污染源中有多个排放源。

水体可受到多方面的污染，其中主要污染源有以下几种：①向自然水体排放的各类废水；②向自然水体直接倾倒的固体污染物以及垃圾堆放场所的渗滤液和淋洗雨水；③大气污染地区的酸雨及其他淋洗降水；④大气中有害的沉降物及水溶性气体；⑤淋洗植被后溶入了化肥和农药的（降水）径流；⑥航道中船舶的漏油、废水及固体废弃物。

水环境的污染源有以上诸多方面，但最普遍、最重要的污染源仍为排放的各类废水。

废水排放引起的水体污染的基本类型主要有需氧型污染、毒物型污染、富营养型污染、感官型污染等。

（1）需氧型污染 大多数有机物（及少数无机物）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，水中的生物（如鱼类）就无法生活。溶解氧耗尽后，水质就腐败，发臭变黑，恶化环境。这种由废水中的有机物引起的水体污染，称为需氧型污染或有机型污染。我国绝大多数水体污染属于这种污染类型。

（2）毒物型污染 废水中的有机毒物（如酚、农药等）、无机毒物（如汞、铬、砷、氰等）以及放射性物质等排入水体后，就会使水生生物受害中毒，并通过食物链危害人体。因毒物排入而造成水体污染，称为毒物型污染，一般发生于排放口附近的水域。

（3）富营养型污染 氮和磷浓度高的废水一旦排入水环境，就会大量孳长藻类及其他水生植物。当冬天这些水生植物死亡时，就会使水的需氧量猛增，危害水生生物的生长。长期的富营养化过程会使水体衰老，由杂草丛生演变为沼泽。水环境的富营养型污染相当普遍，已成为当今世界高度关注的环境问题之一。

（4）感官型污染 废水中的许多污染物能使人感到不愉快，颜色、臭味、泡沫、浑浊就属于此类污染现象，它们对旅游环境的影响十分严重。

（5）其他 浮油、酸碱、病原体、热水等污染物能引起不同类型的水体污染，造成不同的污染危害。

第三节 水体污染防治及污染物总量控制

一、水体污染防治

为防治水污染，保护环境，我国于1984年11月1日起施行《水污染防治法》，要通过一系列行政、法律经济和工程配套措施，建立完善的监督管理系统和机构；制定水环境质量标准和污染物排放标准；规定法律责任。

防止地表水污染的主要措施为：禁止向水体排放油类、酸液、碱液及剧毒废液；禁止在水体清洗装贮过油类或毒物的车辆和容器；禁止将含有汞、镉、铬、砷、铅等的可溶性剧毒废渣向水体排放或不做防渗层而直接埋入地下；禁止向水体倾倒垃圾或其他废弃物；不得在水体最高线以下的滩地和岸坡上堆放废弃物；禁止向水体排放有放射性的废物；不得向水体排放足以引起热污染的废水；不得向水体排放带有病原体而未经消毒的废水；使用农药要保证安全，不得污染水体；农灌水要符合有关规定；船舶的各类废水必须符合排放标准，不得向水体排泄油污。

防止地下水污染的主要措施为：禁止利用渗井、渗坑、裂隙和溶洞排放含毒废水和带菌废弃物；不得采用无防渗措施的沟渠、池塘输送含毒或带菌废水；开采地下水时，应防止已被污染的潜水渗入地下水，并防止水质差异很大的各层地下水相互渗透；兴建地下工程设施或进行地下勘探及采矿时，应采取防护措施，防止地下水污染；人工回灌补给地下水时，不得恶化地下水水质。

水环境区域性综合防治的工程技术措施主要有三项。

(1) 严格控制污染源，减少排污 采用生产工艺无害化、闭路化和工业用水循环等措施，可以做到少排污甚至不排污。对生产工艺落后致使耗水量较大或生产原料、中间产品选择不佳、污染较重的企业进行技术改造；因管理不当而造成严重污染的企业，则可通过加强科学管理以达到减少污染物排放的目的。

(2) 修建有效的废水处理设施 对于城市污水及与其性质相近的废水，在修建处理厂时，应向区域化、大型化发展。与中、小型废水处理厂相比，大型废水处理厂较经济，管理效率高，处理效果好。

(3) 充分利用水体自净能力 充分利用和增加河流的自净稀释能力是治理污染河流的较为经济有效的措施之一。不少国家通过修筑大坝水库、开辟蓄水湖、增加枯水期流量、引水冲污、疏浚河道和河内人工增氧等途径来增加可利用的稀释水量和水中的溶解氧，加强河流的自净能力，增大水环境容量并减少治理费用。还可通过修建贮存塘或贮存调节塘，在水系的枯水期即其自净容量最小时，贮存或调节废水量，减少向自然水体的排污量，使之保持较好的水质状态。

二、实施污染物总量控制的必要性

我国在水污染防治中多年来执行着浓度控制的政策，所颁布的各类水质标准只规定了相应的浓度限值。在一定的经济和技术条件下，实施污染物浓度控制，对水环境污染现状的改善，确实起到了一定的作用。但这种方法没有考虑受纳水体的环境容量。尽管一些单位所排废水的污染物浓度并未超标，但随着企业的发展和人民生活水平的提高，废水排放量大大增加，排入水域中的污染物总量相应增加，在超出水体自净能力的情况下，会导致水体质量下降和水质恶化。而有些单位为满足排污的浓度要求，甚至采用清水稀释污水的做法，这不仅增大了排污总量，也使生产成本提高。

实施污染物排放总量控制，在宏观上，可以有效地控制污染；微观上，能使企业增强参与意识，积极主动地削减污染物排放量。

三、实施总量控制的适用范围

凡属下列情况者，以实施总量控制路线为宜：①实行浓度控制，仍不能实现水环境目标时；②投资欲用于重点污染源治理时；③重要水源保护区内存在无法关、停、并、转的老污染源时；④跨流域或上、下游之间，需要协调污染控制要求及保护标准时；⑤开展行业或重点企业技术改造，确定出环境、技术和经济效益俱佳的优先治理方案时。

四、实施总量控制的条件

如具备下列条件，可认为有实施条件：①完成了排污申报登记，重要污染源的排污总量数据已经核定；②实施总量控制的目标明确，控制项目、区域、阶段要求清楚；③污染源有切实可行的治理措施，有一定的投资金额；④在浓度、总量控制的双轨制上已对排污收费和“三同时”政策进行了相应的调整。

五、总量控制最优治理方案的确定

实施总量控制的目的是有效地进行水污染的区域防治，必须建立在已掌握环境容量的基础上，因此，首先要调查研究区域内水域的污染现状和规律，计算出水体的自净容量，即水体对某一污染物在相应水质标准限值时的极限容纳量，进而确定各种污染物的容许排放总量，容许排放总量应小于水体的自净容量，然后对控制区域中的各个污染源，通过对不同治理方案的技术、经济比较，确定出最优排污分配与治理方案。

第二章 水污染与自净

第一节 废 水

在使用过程中由于丧失了使用价值而被废弃外排的水，称为废水。

污水的分类可分为：

- (1) 生活污水 日常生活中被生活废料所污染的水；
- (2) 工业废水
 - ① 生产污水 污染重，生产中被原料污染的废水；
 - ② 生产废水 污染轻，未被直接污染的废水，如冷却水；
- (3) 初降雨水 被空气、地面的污染物污染的废水。

根据污染物类别的不同，废水可分为有机废水和无机废水两种。前者主要含有有机污染物，相当一部分具有生物降解性；后者主要含无机污染物，无生物降解性。

根据毒物的种类不同，还可把废水分为含酚废水、含汞废水等。应当指出，“含汞废水”仅表明其中主要毒物是汞，并不意味着其中汞的含量最多，或者汞是唯一的污染物。

此外，还可根据产生废水的工业部门或生产工艺来命名。例如，焦化厂废水、食品厂废水、电镀废水和冷却废水等。

第二节 污染物与污染指标

污染物超过环境容量或本底含量就会对水体造成污染。但水体有一定的承受能力，可由混合、稀释、扩散、物化、生物等过程分解污染物，降低其浓度，使水体得到自净。废水中的污染物种类繁多，难于一一列举。根据对环境造成危害的不同，可大致分为以下几个类别：物理性污染（固体污染物、感官污染物、色、温度）、酸碱污染、需氧污染物、毒性污染物、营养污染物、生物污染物及其他污染物等。

为了方便环境管理和污染防治，规定了许多废水水质指标。一种水质指标可能包括一种污染物（如挥发酚、硫化物），也可能包括多种污染物（如需氧污染物）；而一种污染物既可以仅属于一种污染指标（如 H^+ 仅以污染指标 pH 值反映），也可以属于几种污染指标（如有机性悬浮物既是 SS 又是 COD 的构成物质）。水质指标要表示废水的特性、评价处理方法的效果；要测量速度快、准确，具有良好的重现性；要反映对环境的影响程度。

除 pH 值、温度、细菌总数及大肠菌群数、臭味及色度、浊度、放射性物质外，其余污染指标的单位均用 mg/L。

一、物理性污染物

1. 固体污染物

固体污染物在常温下呈固态，它分无机物和有机物两大类。

固体物质在水中有三种分散状态：溶解态（直径小于 1nm）、胶体态（直径介于 1~1000nm）、悬浮态（直径大于 1000nm）。在水处理技术中，由于直径介于 100~1000nm（甚至 2000nm）的固体微粒的悬浮能力也很强，因而分离这类颗粒仍采用分离胶体微粒的凝聚法，故在技术上也把胶体微粒的上限扩大到 1000~2000nm。此外，水质分析中把固体物质分为两部分：能透过滤膜或滤纸（孔径因材料不同而异，约 3~10 μ m）的叫溶解固体

(DS)；不能透过者叫悬浮固体或悬浮物 (SS)，两者合称总固体 (TS)，或总固形物。必须指出，这种分类仅仅是为了水处理技术的需要。固体物组成分析示意图见图 2-1。

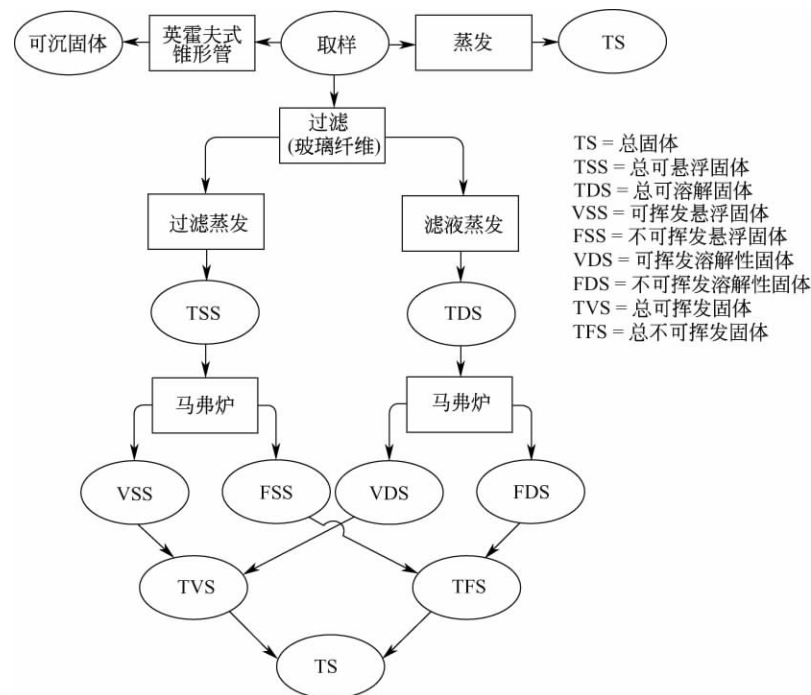


图 2-1 固体物组成分析示意图

在紊动的水流中，悬浮物能悬浮于水中，但悬浮是有条件的，并具有暂时性，一旦维持悬浮的条件（水的紊动）消失，它就从水中分离出来。对水的相对密度大于 1 的沉入水底，对水的相对密度小于 1 的浮于水面。通常把前者叫做沉降性悬浮物，后者叫做漂浮性悬浮物。沉降性悬浮物中能在技术操作（一般对水的相对密度不大于 2）内用标准沉降管沉降分离的，叫做可沉物（其颗粒大体在 $10\mu\text{m}$ 左右）；难于沉降分离的，叫做难沉物。

悬浮物是废水的一项重要水质指标。在技术上根据实际情况，经常分析悬浮物的粒径分布 (Particle Size Distribution)、浊度 (Turbidity)、吸光度/透光度 (Absorbance/Transmittance)、电导率 (Electro Conductivity) 及密度/相对密度 (Density/Specific Gravity)。

悬浮物的主要危害是造成沟渠管道和抽水设备的堵塞、淤积和磨损；造成接纳水体的淤积和土壤空隙的堵塞；降低光的穿透能力，有机悬浮物大量消耗溶解氧，影响水生生物的生长，造成水生生物呼吸困难；造成给水水源的浑浊；干扰废水处理和回收设备的工作。由于绝大多数废水中都含有数量不同的悬浮物，因此去除悬浮物就成为废水处理的一项基本任务。

溶解固体 (DS) 中的胶体是造成废水浑浊和色度的主要原因。少数废水含有浓度很高的溶质（主要为无机盐类），对农业和渔业有不良影响。

2. 感官污染物

废水中的异色、浑浊、泡沫、恶臭等现象能引起人们感官上的极度不快。对于供游览和文体活动的水体而言，其危害更为严重。各类水质标准中，对色度、臭味、浊度、漂浮物等水质指标做了相应的规定。

(1) 温度 废水温度过高的危害，叫做热污染，热污染的危害是水温升高，会造成：

① DO 减少，鱼类死亡，水体腐败；

- ② 使水的物理化学性质发生变化（溶解度、黏度），破坏生物处理过程；
- ③ 危害水生物和农作物；加速水体的富营养化过程，细菌、藻类繁殖加快。

(2) 色度 生活污水呈黑灰色（工业废水颜色差异很大），色度加大，影响透光率，影响光合作用。

(3) 臭味 有机物厌氧腐败，还原性硫和氮的化合物、挥发性有机物、氯气等有异臭，盐类有异味。

3. 酸碱污染物

酸碱污染主要是由进入废水的无机酸和碱造成的，水质标准中以水质指标 pH 值反映其含量水平。酸性废水的危害主要表现在对金属及混凝土结构材料的腐蚀上。碱性废水易产生泡沫，使土壤盐碱化。各种动植物及微生物都有各自适应的 pH 值范围；pH 值超过其适应范围能抑制生化反应，造成危害，严重时导致生物死亡，引起水体 pH 值变化，造成水质恶化，腐蚀管道。酸碱污染造成盐污染，无法饮用。

4. 硫酸盐和硫化物污染

此污染大量来源于工业废水，少量来源于生活污水，其危害主要是：在水中易形成 H_2S ，对生物有害；不利于污水处理；饮用这种水过多会引起腹泻；水体缺氧时发生厌氧消化，水体有臭味。

二、化学性指标

(一) 需氧污染物

能通过生物化学（个别情况下还有化学）作用消耗水中溶解氧的化学物质，统称为需氧污染物。

无机的需氧污染物为数不多，主要有 Fe 、 Fe^{2+} 、 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 S^{2-} 、 SO_3^{2-} 、 CN^- 等。绝大多数需氧物是有机物，因而在特定情况下，需氧物即指有机物。

虽然绝大多数有机物为需氧物，但也有一部分有机物不是需氧的。前者称为可生化有机物，后者称为非生化有机物。可生化有机物被微生物分解利用的难易程度不同，因而又分为难降解有机物和易降解有机物。

需氧物对环境水体造成两方面的危害。好氧微生物和兼性微生物在吸收利用需氧物（主要为有机物）的生化过程中，要消耗溶解氧。当消耗量大于补充量时，溶解氧浓度就要降低。当浓度低于某一限值，水生动物的生活就受到影响。例如，鱼类要求氧的限值是 $4mg/L$ ，如果低于此值，会大量死亡。当溶解氧消耗殆尽时，厌氧微生物和改变了代谢方式的兼性微生物就以优势种群生活于水中，进行厌氧分解。这时，代谢产物中的硫化氢对生物有致毒作用，硫化氢、硫醇和氨等还能散发出刺鼻的恶臭，形成的硫化铁能使水色墨黑，还会发生底泥冒泡和泥片泛起，这就是水质腐败的现象，它严重影响环境卫生和水的使用价值。

需氧物常用水质指标间接表示。最常用的指标是生化需氧量（Biological-Chemical Oxygen Demand, BOD）、化学需氧量（Chemical Oxygen Demand, COD）和高锰酸盐指数。

用生化过程中消耗的溶解氧量来间接表示需氧物的多少，称为生化需氧量（BOD）。BOD 是利用有氧条件下有机物分解都要消耗溶解氧的特点借助微生物来体现的，在水温 $20^\circ C$ 的条件下，以微生物的生化活动，将有机物氧化为无机物所消耗的溶解氧量来表示有机物的量。如 BOD_5 、 BOD_{20} 、 BOD_u 。指标意义在于可限制水中能被微生物分解的有机量；可模拟污水在水体流动自净过程中耗氧规律；判断处理程度。

必须指出，生化需氧活动的过程很长，且具有明显的阶段性。在第一阶段，把不含氮有机物转化为 CO_2 和 H_2O ，把含氮有机物转化为氨，这个过程称为氨化或无机化。参与分解的是异养型微生物。在第二阶段，氨依次被转化为亚硝酸盐和硝酸盐，这个过程称为硝化，

参与转化的是化能自养型微生物（硝化菌），见图 2-2。生活污水在标准控制温度为 20℃ 时的氨化过程历时 10 多天到 20 天。氨化的结果表明，有机物基本上无机化了。有机物在 20 日内消耗的溶解氧量，叫做 20 日生化需氧量，用 BOD_{20} 表示。显然，这个测定时间太长了，难于指导生产实践。一般均采用 5 日（20℃）的测定时间，在此期间所消耗的溶解氧量叫做 5 日生化需氧量，以 BOD_5 表示。各种废水的水质差异很大，其 BOD_{20} 或 BOD_5 值相差悬殊。但就某一种废水而言，两者有一个稳定的比值。例如，生活污水的 $BOD_5 : BOD_{20} \approx 0.7$ 。

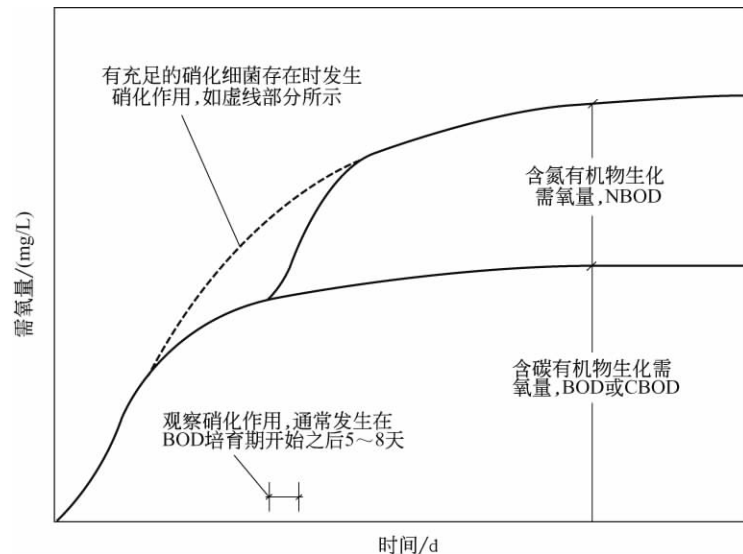


图 2-2 典型废水 BOD 曲线图

BOD_5 作为水质指标的缺点是：

- ① 时间长，需要 5 日出结果；
- ② 难降解有机物含量高时，误差较大；
- ③ 水中含有抑制物质或毒物时，影响测定结果。

COD 是在酸性条件下，利用强氧化剂将有机物氧化为 CO_2 和 H_2O 所消耗的氧的量，称为化学需氧量。COD 是将强氧化剂折合为氧的当量来表示有机物的量。COD 指标的意义是可氧化全部有机物，检测速度快，重现性好，不受抑菌因子影响。用化学氧化剂 $K_2Cr_2O_7$ 或 $KMnO_4$ 氧化分解有机物，用与消耗的氧化剂相当的氧量来间接表示需氧物的多少，分别称为化学需氧量（COD）和高锰酸盐指数。在有些文献中，两者分别用 COD_{Cr} 和 COD_{Mn} 来表示。由于重铬酸钾氧化能力强（80%~90%）， COD_{Cr} 在污水中常用；而高锰酸钾氧化能力差，所以 COD_{Mn} （OC）在给水中常用。

对于同一水样： $COD > BOD_{20} > BOD_5 >$ 高锰酸盐指数，见图 2-3。 BOD_5 和 COD 的比值是衡量废水可生化性（即可进行生化处理）的一项重要指标，比值愈高，可生化性愈好，一般认为， $BOD/COD \geq 45\%$ ，易生化， BOD/COD 在 35%~45%，可生化， BOD/COD 在 25%~35%，难生化， $BOD/COD < 25\%$ ，不可生化。

除以上几种测定需氧物的方法外，还有总需氧量（Total Oxygen Demand, TOD,）和总有机碳（Total Organic Carbon, TOC, 包括水样中所有有机污染物质的含碳量）两种表示有机污染物的方法。

TOD 是有机物全部被氧化时的需氧量。在 900℃ 的高温下，以铂为催化剂，使水样汽

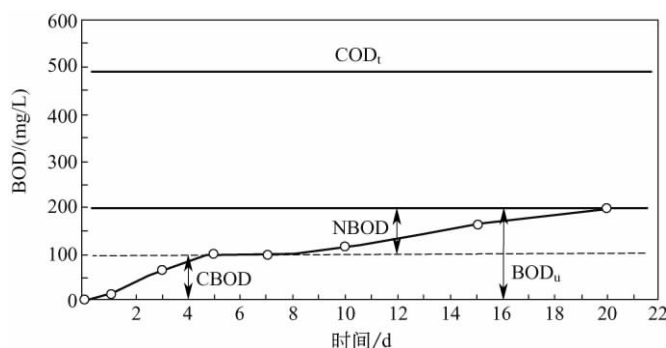


图 2-3 BOD 和 COD 的关系

化燃烧，然后测定气体载体中氧的减少量作为有机物完全氧化所需的氧量，称为总需氧量。如在相同条件下，测定气体中的 CO_2 增量，从而确定水样中碳元素的含量，用以判定有机物含量，称为总有机碳。总需氧量法和总有机碳法的特点是测定迅速，但仪器较昂贵。对于同一污水，一般有 $\text{TOD} \geq \text{COD} \geq \text{BOD}_{20} \geq \text{BOD}_5 \geq \text{TOC}$ 。

(二) 毒性污染物

废水中能对生物引起毒性反应的化学物质称为毒性污染物，简称为毒物。工业上使用的有毒化学物质已超过 10000 种，因而已成为人们最关注的污染物类别。

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，严重时可导致死亡。毒物对鱼类的急性中毒量，通常以半数死亡浓度 TLM 表示，即在 24h 或 48h 内使供试鱼类 50% 致死的毒物浓度。慢性中毒的初期效应很不明显，但长期积累可致突变、致畸、致癌、致死，甚至引起遗传性畸变。目前，对微量毒物尚缺乏合理的判定标准。

大多数毒物的毒性与浓度和作用时间有关，浓度越大，作用时间越长，致毒后果越严重。此外，毒物反应与环境条件（温度、pH 值、溶解氧浓度等）和有机物的种类及健康状况有关。毒物是重要的水质指标，各类水质标准中对主要的毒物都规定了限值。

废水中的毒物有三大类：无机化学毒物、有机化学毒物、放射性物质。

1. 无机化学毒物

无机化学毒物分为金属和非金属两类。金属毒物主要为重金属（相对密度大于 4~5）。废水中的重金属主要是汞、铬、镉、铅、锌、镍、铜、钴、锰、钛、钒、钼、铋等，特别是前几种危害更大。在轻金属中，铍是一种重要的毒物。

甲基汞能大量积累于大脑中，引起乏力、末梢麻木、动作失调、精神混乱、疯狂痉挛。六价铬中毒能使鼻膈穿孔，皮肤及呼吸系统溃疡，引起脑膜炎和肺癌。铬中毒引起全身疼痛、腰关节受损、骨节变形，有时还会引起心血管病。铅中毒引起贫血、肠胃绞痛、知觉异常、四肢麻痹。镍中毒引起皮炎、头疼、呕吐、肺出血、虚脱、肺癌和鼻癌。锌中毒能损伤胃肠等内脏，抑制中枢神经，引起麻痹。铜中毒能引起脑病、血尿和意识不清等。铍中毒能引起急性刺激，招致结膜炎、溃疡、肿瘤和肺部肉芽肿大（铍肺病）。

作为毒物，重金属具有以下特点：①其毒性以离子状态存在时最为严重，故通常称重金属离子毒物；②不能被生物降解，有时还可被生物转化为更毒的物质（如无机汞被转化为烷基汞）；③能被生物富集于体内，带正电的与负电胶体黏附，向下游迁移沉积、次生污染源而难处理，既危害生物，又能通过食物链危害人体。

重要的非金属毒物有砷、硒、氰、氟、硫（ S^{2-} ）、亚硝酸根离子（ NO_2^- ）等。砷中毒能引起中枢神经紊乱，诱发皮肤癌等。硒中毒时能引起皮炎、嗅觉失灵、婴儿畸变、肿瘤。

氟中毒能引起细胞窒息、组织缺氧、脑部受损等，最终可因呼吸中枢麻痹而导致死亡。氟中毒能腐蚀牙齿，引起骨骼变脆或骨折；氟对植物的危害很大，能使之枯死。硫中毒能引起呼吸麻痹和昏迷，最终导致死亡。亚硝酸盐中毒能使幼儿产生变性血红蛋白，造成人体缺氧；亚硝酸盐在人体内还能与仲胺生成亚硝胺，具有强烈的致癌作用。

必须指出的是许多毒物元素往往是生物体所必需的微量元素，只是在超过一定标准时，才会致毒。

2. 有机化学物

有机毒物种类繁多，在水质标准中规定的有机化学毒物有：挥发酚、苯并 [a] 芘、DDT、六六六等。酚有蓄积作用，对人和鱼类危害很大，它使细胞蛋白质变性和沉淀，刺激中枢神经系统，降低血压和体温，麻痹呼吸中枢。苯并 [a] 芘是众所周知的致癌物。多氯联苯能引起面部肿瘤、骨节肿胀、全身性皮炎、肝损伤等，并有致癌作用。有机农药（杀虫剂、除草剂、选种剂）分有机氯、有机磷和有机汞三大类。有机氯（DDT、六六六、艾氏剂、狄氏剂等）的毒性大、稳定性高。DDT 能蓄积于鱼脂中，可高达 12500 倍，使鱼卵不能孵化。

3. 放射性物质

放射性是原子裂变而释放射线的物质属性。对人体有危害的电离辐射有 X 射线、 α 射线、 β 射线、 γ 射线及质子束等，射线通过物质时会产生离子。废水中的放射性物质一般浓度较低，只能引起慢性辐射和后期效应，如诱发癌症（白血病），对孕妇和胎儿产生损伤，缩短寿命，引起遗传性伤害等。放射性物质的危害强度与剂量、性质和身体状况有关。半衰期短的，其作用在短期内衰退消失；半衰期长的，长期接触有蓄积作用，危害甚大。

三、营养性污染物

氮和磷是植物和微生物的主要营养物质。氮和磷的浓度为 0.2mg/L 和 0.02mg/L 时，会引起水体的富营养性变化，促使藻类大量繁殖，在水面上聚集成大片的水华（湖泊）或赤潮（海洋）。当藻类在冬季大量死亡时，水中的 BOD 值猛增，导致腐败，恶化环境卫生，危害水产业。

1. 氮、磷的评价指标

总氮（TN）：包括有机氮、氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮。

氨氮： NH_3 与 NH_4^+ ，属于污水中的碱性物质，为微生物提供氮源。

凯氏氮（KN）：有机氮 + 氨氮，能为微生物所利用（好氧）。

亚硝酸盐氮和硝酸盐氮 = 总氮 - 凯氏氮。

有机氮 = 凯氏氮 - 氨氮。

磷的化合物分为有机磷和无机磷，一般测总磷（TP）。

2. 含氮化合物在水体中的转化（图 2-4）

第一步，有机氮（Organic N）包括蛋白质、氨基酸，水解转化为 NH_3 和 NH_4^+ ，过程为有氧或无氧，称氨化阶段；

第二步， NH_3 先转化为 NO_2^- ，再转化为 NO_3^- ，有氧时称硝化阶段；

第三步， NO_3^- 与转化为 N_2 ，缺氧时称反硝化阶段。

含 P 化合物的转化较复杂，存在有机与无机之分。

有机磷（Organic P，包括磷脂、DNA/RNA）：有机磷 → 分解 → 正磷酸（orthophosphate， $\text{PO}_4^{3-} + \text{HPO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{H}_3\text{PO}_4$ ）。

正磷酸 → 生物累积 → 聚磷酸（polyphosphate）。

可溶性磷与钙、铁、铝形成难溶性沉淀。

3. 氮磷污染与水体的富营养化

营养化是水体演化的一种规律，贫营养湖→富营养湖→沼泽地→陆地。

由于 N、P 的存在导致富营养化问题，促进了水生生物的活性而造成异常繁殖，富营养化表现为：

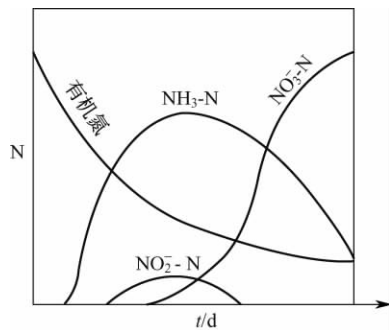


图 2-4 水体中不同形态氮随时间变化

(1) 藻类多使鱼类生存空间减少，死亡的藻类沉积在水体底部；

(2) 藻类种类减少，硅藻、绿藻、蓝藻大量繁殖；

(3) DO 下降，缺氧造成水生生物死亡。

此外，BOD、温度、维生素类物质也能触发和促进富营养性污染。

四、生物污染物

生物污染物主要是指废水中的致病性微生物及其他有害的有机物。废水中的绝大多数微生物是无害的，但有时却能含有各类致病微生物。例如，生活污水中可能含有能引起肝炎、伤寒、霍乱、痢疾、脑炎的病毒和细菌以及蛔虫卵和钩虫卵等；制革厂和屠宰场的废水中常含有炭疽杆菌和钩端螺旋体等；医院、疗养院和生物研究所排出的废水中含有种类繁多的致病体。水质标准中的卫生学指标有细菌总数和总大肠菌群两项，后者反映水体中受到动物粪便污染的状况。除致病体外，废水中若生长铁细菌、硫细菌、藻类、水草或贝壳类动物时，会堵塞管道和用水设备等，有时还腐蚀金属和损害木质，也属于生物污染。

生物污染物中，病毒的个体甚小，约 20~300nm。其他生物污染（如细菌的个体为 0.7~10 μ m、藻类和寄生虫卵等）的个体均甚大，它们在水中呈悬浮状态。

生物指标主要有细菌总数和大肠菌群，其中细菌总数采用平板计数法（HPC）。大肠菌群包括总大肠菌类（Total Coliforms）、粪便大肠菌类（Fecal Coliforms, FC，在 44.5 $^{\circ}$ C 下培养，可将乳糖发酵之大肠菌类）及粪便链球菌属（Fecal Streptococci, FS）。当 FC/FS>4，污染主要来自人类，当 FC/FS<0.7，污染主要来自动物。

五、油类污染物

油类污染物包括矿物油（石油）和动植物油中的液体部分，均难溶于水，粒径较大的分散油易聚集成片，漂浮于水面；粒径介于 100~10000nm 的油珠易被表面活性剂和疏水固体所包围，形成乳化油，稳定地悬浮于水中。

油类污染物常覆盖于水面，影响氧的溶入；它还能附着于土壤颗粒表面和动植物体表，影响养分的吸收和废物的排出，沾染油的鱼具有异臭。油类污染物的水质指标有“石油类”和“动植物油”两项，两者均是构成 COD 值的部分。

第三节 废水水质与控制标准

一、废水水质

废水造成的污染危害以及应采取的防治措施，都取决于废水的特性，即其中污染物的种类、性质和浓度。

表 2-1 列举了典型的生活污水水质，其中最主要的两项污染指标是 SS 和 BOD₅，其浓度值分别为 100~350mg/L 和 110~400mg/L。多数工业废水的主要污染指标仍为 SS 和 BOD₅，但其浓度却相差悬殊，例如，造纸黑液中的 SS 变化于 2500~10000mg/L 之间，而人造纤维废水却只有 50~200mg/L；造纸黑液的 BOD₅ 为 9000~30000mg/L，而板纸废水的却只有 50~200mg/L。除 SS 和 BOD₅ 外，工业废水的重要特性是出现了毒性污染物和酸