



高等学校教材

高等学校教材

环境

水利学

环境水利学

清华大学 王蜀南

西北农业大学 王鸣周

合编



高等学校教材

环境水利学

清华大学 王蜀南
西北农业大学 王鸣周 合编



388527

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书系高等学校水资源、水文、农水等专业必修课教材。全书共分六章。主要内容包
括：①水资源保护，即重点介绍各类污染物进入水体后的迁移转化规律及建立水质标准、
进行水质调查、评价水质和控制优化水质的系统方法。②水利水电工程的环境影响评价，
即介绍大中型水电工程的开发对周围环境的影响因素及改善不利影响的措施，并结合工
程实例介绍环境影响评价的主要方法、步骤等。

本书除作教材外，亦可供水资源保护及水利水电工程规划设计工作者参考。

2p34/04

图书在版编目 (CIP) 数据

环境水利学/王蜀南, 王鸣周编. —北京: 中国水利水电出版社, 1996
高等学校教材

ISBN 7-80124-137-1

I. 环… I. ①王… ②王… III. 水利工程-环境保护-高等学校-教材
N. X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 08018 号

书 名	高等学校教材 环境水利学
作 者	清华大学 王蜀南 合编 西北农业大学 王鸣周
出 版	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044)
发 行	新华书店北京发行所
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 11.5 印张 265 千字
版 次	1996 年 10 月第一版 1996 年 10 月北京第一次印刷
印 数	001—720 册
定 价	9.00 元

前 言

随着水资源的开发利用和水利水电建设事业的发展,愈来愈多的工程技术和管理人员认识到水污染不仅影响、限制了工农业的发展,还直接危及人类健康。据联合国发表的《保护世界水资源报告》,发展中国家约有 3/4 的农村人口和 1/5 的城市人口“常年不能获得安全卫生的饮用水”,约有 17 亿人“没有足够的饮用水”。据估计,全世界每年约有 4200 亿 m^3 的污水排入江河湖海,使 55000 亿 m^3 的淡水资源受了污染!因此,开展水资源保护工作已迫在眉睫。同时,一些大中型水利水电工程建设对周围生态环境均会产生一定的不利影响,应在规划、设计、施工和运行管理中考虑到与水利有关的环境问题,提出相应的技术要求及改善措施,以尽量减少和避免那些不利影响。目前水资源保护和水利工程的环境影响问题已成为水利部门的重要工作内容,并要求各大专院校增设环境水利学课程,以扩展专业知识面,适应水利水电建设事业发展的需要。

涉及环境水利学的内容甚广,本课程在环境生态学和环境水化学的基础上,主要介绍水体污染与水体自净、水资源保护、水质数学模型与环境容量、水污染控制规划、水利水电工程对环境的影响及评价,以及与上述内容有关的一些基础知识。

本教材由王蜀南负责统稿,参加编写者有王蜀南(第一、三、六章)、王鸣周(第二、三章)和吕贤弼(第四、五章)。全书由吴贻名教授审稿并给予了热情指导,谨在此表示深切的谢意。限于编者水平有限,在编写中不免有谬误和不妥之处,请读者批评指正。

编 者

1994 年 12 月

目 录

前 言	
第一章 绪论	1
第二章 水体污染与水体自净	3
第一节 水体及水体环境条件	3
第二节 水体污染及其危害	4
第三节 水体自净能力	18
第三章 水资源保护	24
第一节 水资源保护工作的基本内容	24
第二节 水体污染源的调查、评价及预测	26
第三节 水体污染的调查、监测、评价和预测	33
第四节 水体污染的综合治理与污水处理	56
第四章 水质模型与环境容量	61
第一节 水质模型的分类与建立步骤	61
第二节 物质输移的基本方程	62
第三节 河流水质模型	70
第四节 河口水质模型	89
第五节 湖泊、水库的水质模型	92
第六节 非点源污染	95
第七节 地下水水质模型	100
第八节 水质模型的参数估值	102
第九节 水体环境容量	113
第五章 水污染控制规划	116
第一节 概述	116
第二节 水污染控制的工程措施及经济评价	117
第三节 水污染控制系统及规划分类	120
第四节 几种规划方法的介绍	122
第六章 水资源工程对环境的影响及评价	147
第一节 水利水电工程对环境的影响及其改善措施	147
第二节 流域性水利工程对环境的影响及其改善措施	164
第三节 水利水电工程的环境影响评价	166
参考文献	178

第一章 绪 论

环境水利学是在 70 年代初期形成环境学这门独立的、新兴的学科以后,向水利工程学内渗透而形成的一个新分支。它是研究人类在开发和利用水资源过程中出现的与环境有关的新问题,揭示水资源开发利用、修建水利工程与环境之间的对立统一关系,从而进一步认识和掌握其发展规律,充分利用和发挥其积极作用,抑制和改造其消极作用,使环境朝着有益于人类的方向发展,以维护生态平衡,为人类创造一个更加美好和更加舒适的自然环境。

环境水利问题是水利建设出现的新问题。早在 1973 年第 11 届国际大坝会议上,超出历届的议题,以“建坝对环境的影响”为中心进行了讨论。提出了建坝应考虑对周围环境的影响,如对局地气候、水库水质、水温,以及水库淤积、岸坡稳定等一系列环境水利问题,进行了详细的分析和论述。现在看来,环境水利问题包括的内容是很广的,主要有以下两部分内容:

(1) 周围环境及其变化对水资源的开发和利用的影响。从水量上看,地球上水资源总量约为 14 亿 km^3 ,数量不少。但人类可利用的淡水资源(河流、湖泊、地下水等)仅占全球水资源总储量的 0.3% 。全球河川径流量按世界人口平均计,每人每年为 12900 m^3 。由于水资源的分布在时间上和地理位置上都极不均匀,导致干旱缺水、洪涝灾害时有发生。而我国每人每年仅有 2400 m^3 ,为世界人均占有量的 $1/4^{[13]}$ 。远不能满足工农业发展和人民生活的需要。水资源虽然是可以自己循环不断更新的自然资源,如果不能合理开发利用,破坏了水资源的生态平衡,不仅产生水资源危机,还会出现一系列环境问题,影响人类的生存和发展。当今世界,人类正面临着一系列全球性的环境问题:气候变暖、臭氧层耗损、酸雨沉降、草原沙化、森林减少、物种大量灭绝、水土流失加剧、水源不足、水污染及人口膨胀等。这些均与水资源有着密切的关系,例如气候变暖温室效应增强,加大了地表水的蒸发量,使本来缺水地区造成严重干旱、土地沙化、碱化及草原退化,而另一些地区受高温季风影响,导致出现台风灾害和暴雨洪涝灾害。据分析 1991 年我国华北地区持续干旱,而长江下游连续暴雨,发生严重洪涝灾害。同年,世界上不少地方也出现了气候异常。认为这是温室效应增强气候变化的重要因素之一。随着工农业的急剧发展和居民城镇化,人均用水量在不断增长。据科学家测算:公元前每天人均耗水约 12 L ,中世纪约 $20 \sim 40 \text{ L}$,18 世纪工业革命开始后耗水猛增,到 20 世纪 80 年代发达国家人均日耗水竟达 500 L 左右。全世界用水量将从 1985 年的 3900 亿 m^3 增至 2000 年的 6000 亿 m^3 ,人类将面临更加严峻的水资源短缺问题。与用水同时存在的排水问题更难解决,工农业和城镇的废水排入江河,不仅数量大、成分复杂、种类繁多,有的含剧毒、难降解,使水体遭到不同程度的污染。到目前为止,全世界在水中已测出 2221 种有机化学污染物。使原来洁净的江河、湖泊(水库)及地下水体遭到污染,水质下降直接影响水资源的开发和利用,大大降低了水资源的使用价值,更加剧了水资源的供、需矛盾。总之,对水资源无限制的开发、利用,使水资

源枯竭，把江河、湖泊当成天然的排污沟，水质污染已成为世界性的问题。据医学家估计，世界上每四个病人中就有一个是因水污染而致病的。因此，水资源保护工作是环境水利学的重要内容之一。水资源保护工作主要包括：①水质监测、调查与评价。②各类水质标准的建立，如地面水环境质量标准、生活饮用水卫生标准等。③水质管理，其中包括法制和科学技术管理。④水质规划、预测、预报等。

(2) 水资源的开发、利用和修建水利工程对周围环境的影响。一些大中型水利工程，包括大中型水利水电枢纽工程、跨流域调水工程，以及大中型灌溉、排水工程等，在建成后都会对周围环境产生各种不同的影响。这些影响中主要是有利的，如防洪、发电灌溉、供水等，这在兴建工程中均有较多的论述。但也有些是不利的，这多是因为工程建设不当或预先估计不足而出现意想不到的环境影响问题，特别是对周围生态环境的影响。甚至有些不利影响妨碍了工程效益的正常发挥。例如我国三门峡水库因未考虑泥沙的影响，而被迫放弃了高坝、大库的设计方案，改建为低水头径流发电。因此在水资源的开发、利用，特别是大型水利工程的兴建中，为了更合理地利用水土资源、保护环境和促进环境质量的提高及保持生态平衡，在进行水利工程规划、设计的同时，必须对兴建工程的所有利、弊作出详细的分析、比较，进行待建工程的环境影响评价。以便了解工程实施后可能引起的自然环境和社会环境的改变，从而根据工程不同方案的技术、经济和环境指标，选择对国民经济最有利而对环境不利影响最小的方案，并提出相应的改善措施以致替代方案。环境影响评价工作是 70 年代后出现的，我国在 1982 年颁发《中华人民共和国水利部关于水利工程环境影响评价的若干规定（试行）》及 1989 年颁发的《水利水电工程环境影响评价规范（试行）》，这项工作作为一种制度建立以后，限制了那些对环境危害较大又暂时得不到解决的项目，因此，对保护环境起到了良好的效果。

环境水利学在国外有“水—环境”、“水资源—环境工程”等类似的名称，它是以研究人类开发、利用水资源与环境质量控制之间关系的学科。除了应用原有的物理学、水力学、水文学、水利工程建筑学知识外，还涉及到生态学、生物学、化学，以及环境学、经济学、系统工程学等学科。特别是计算机的广泛应用，在污染控制的规划和治理过程中，应用水质数学模型进行模拟、评价、预测各种方案，为更准确、更迅速地作出决策提供了科学依据。因此，它为传统的水利学增添了新内容，它具有跨部门、多学科、综合性强的特点。这就需要各方面的工作人员，除水利工程、环境工程外，还需要环境生态学、环境化学、环境地质学、环境经济学等方面的人员团结协作、共同努力，以推动环境水利学科的不断发展和进一步完善。

第二章 水体污染与水体自净

第一节 水体及水体环境条件

一、水体概念

(一) 水与水体

纯净的水是由氢、氧元素组成 (H_2O)，无色、无味、透明，是一种很好的溶剂。水不仅有极强的溶解力，还有较强的渗透力。水在自然界处于不断的循环运动中，它通过渗透土壤、冲刷岩石，富集了土壤和岩石中的盐分和有机物。水汽在空中凝成水滴和下降过程中吸收、溶存了空气中不同的气体和各种飘尘、杂物。自然水体中还生存着各类水生生物。因此，自然界里不存在纯净的水。

水体与水的概念不同，水体又称水环境，一般指江河、湖泊、沼泽、水库、地下水及海洋等贮水体的总称。水体应包括水、水中的悬浮物、溶解物质、底泥甚至水生生物等。多是一个完整的生态系统，或是一个完整的自然综合体。水体中化学组成十分复杂，物理、化学、生物作用更是错综复杂。一般水体的温度自水面向下递减；溶解氧含量也向下迅速减少，即由氧化环境转变为还原环境；阳光也自上向深处减弱，由强光环境变为弱光环境。因此水生生物自上而下出现不同的变化。污染物进入水体后，因水体特点不同，将会发生各种各样反应，其中生物作用在污染物质的转化中起着重要作用。

(二) 水体类型

1. 按类型分

(1) 海洋水体

(2) 陆地水体 { 地表水体——河流、湖泊（水库）等 地下水体

2. 按区域分

按区域划分是指某一具体被水覆盖的地段而言。如长江、黄河为分属不同流域的水系。此外，水体根据流动特性可分为流动水体和静水水体等。

二、水体环境条件

(一) 河流水环境条件

河流是动水环境，河水中的悬浮物质、溶解物质、水生生物及流入的污染物，均随水流动。流动水面与大气交界面经常相互混掺，复氧条件好，利于水生生物生长和有机污染物的降解。河流中生活的许多生物对水中溶解氧含量的高低非常敏感。

河流底质对河水中动植物影响很大，砂和粉砂河底不利于底栖生物和附生植物生存，粘土和岩石河底较为有利，卵石和砾石河床具有多种附着面及洞穴、裂隙等，使底栖动植物避开急流冲击，从而获得较高的生产力。

河流从源头到入海口，沿途流经地区复杂，形成很大差异。一般上游河底坡降大，底质为岩石或砾石，悬浮物和有机质含量低，水流清澈，流速大甚至有浅滩、瀑布，因而水

中溶解氧含量高。而河流下游一般河底坡降变小，河宽加大，流速降低，水中悬浮物、沉积物增多，阳光透入随深度减小，水流较混浊。河流底质多为粉细沙或淤泥。河水复氧能力降低，再加上沿途流入各种污染物，致使水中溶解氧含量偏低。

(二) 湖泊水环境条件

湖泊属于静水环境，一般水深较大。由于阳光随水深减弱，故湖泊底部光合作用降低。典型的深水湖泊，在夏季有明显的分层现象。湖水表层在阳光照射下形成明显的上层暖水，深水底层水温较低，常在 4°C 左右。表层水与深层水之间的过渡层，叫温跃层。温跃层内水

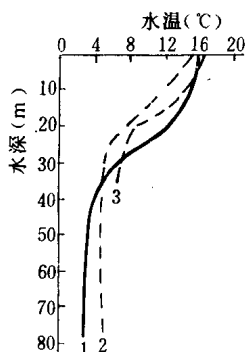


图 2-1 水温垂直分布图

1—赛里木湖 (1969 年 8 月 9 日);

2—新疆天池 (1969 年 8 月 27 日);

3—青海湖 (1962 年 8 月 9 日)

温降低速度大，通常水深每增加 1 m 温度至少下降 1°C 。具有这种特性的湖泊叫分层湖，如图 2-1 所示。我国东部许多淡水湖，水深不超过 15 m ，在夏季湖水混合均匀，没有明显的分层现象，如洞庭湖、鄱阳湖等。深水湖泊，在秋季随太阳光的减少，表层水变冷直到和深层水一样的温度时，湖泊水温变成等温的。冬季，在寒冷地区湖面结冰，形成逆向温度结构，冰上气温再降低水温也不会低于 4°C 。春季冰层融化，温度上升，直至 4°C 时又一次出现等温现象。夏季表层水再次变暖，又形成分层现象。

湖水中光照强度随深度递减，光合作用减弱，当光照强度等于水面日光辐射的 1% 的相应深度称为补偿深度。在该深度以上是光亮层，以下是深底层。光亮层内自养生物占优势，同时还有自游生物、漂浮生物及浮游动物。深

底层中因光线弱，异养生物占优势。沿岸浅水区有丰富的光照和氧气，水中养分含量高，多生长水生的高等植物和浮游藻类。

(三) 水库水环境条件

水库水环境条件介于河流与湖泊之间，大坝拦蓄水流使流水环境变为相对静止的静水环境，但却多设有底孔、溢洪道、给水管等泄水建筑物，使相当部分水流沿一定方向流动，因此它兼有河流和湖泊的特征。水库修建后水环境条件变化将在第六章详细论述。

一般影响水体环境条件的主要因素有：温度、光照、溶解氧、流速、流量、 pH 值等。有时即使水体类型相同，但地理位置、季节不同，所形成的水环境条件却有很大差异。

第二节 水体污染及其危害

一、水体污染概念

由于人类活动排放的污染物进入河流、湖泊、海洋或地下水等，超出了水体所能容纳的程度——自净能力时，使水体的物理、化学性质以及生物群落组成发生变化，从而降低了水体的使用价值，危害人体健康和生态环境，这种现象称为水体污染。

关于水体污染目前还有以下两种看法：①认为水体受到人类活动影响后改变了它的“自然”状况，即进入水体的某种物质超过了水体的本底含量。②认为某种污染物质进入水体后，使水体质量变劣，破坏了水体的原有用途。显然，第一种看法是从绝对意义上来理

解水体污染, 由于人类活动已经大大改变了自然环境, 已难找到“自然”状况的水。第二种看法没考虑水体的自净能力, 这也是不经济的。

二、水体污染的机理和特点

(一) 水体污染的机理

水体污染是物理、化学、生物、物理化学与生物化学综合作用的结果。在某些条件下可能以某一种为主, 现分述如下。

1. 物理作用

污染物质(包括热能等)进入水体后, 只影响水体的物理性质、状态、分布而不改变水体的化学性质, 也不参与生物作用。例如污染物质在水中的扩散、迁移、沉降与积累和再悬浮等。污染物浓度的变化规律是研究水体污染的基本内容。

影响物理作用的因素是污染物的物理特性和水体的物理特性(包括温度、密度等), 以及水体的水力学特性和自然条件等。

2. 化学与物理化学作用

污染物质在水中多以离子或分子状态随水流移动。在移动过程中水体发生化学变化, 如酸化或碱化—中和、氧化—还原、分解—化合、吸附—解吸、胶溶—凝聚等, 这些化学与物理化学作用可能改变污染物质的迁移、转化能力、污染物毒性及水环境化学的反应条件。

影响化学与物理化学作用的因素是污染物的化学与物理化学特性、水体本身的化学与物理化学特性以及水体的自然条件等。

3. 生物与生物化学作用

污染物质进入水体后, 还受到生物的生理、生化作用和通过食物链的传递过程发生分解作用、转化作用和富集作用。

生物与生物化学作用可将有害的有机污染物分解为无害物质, 这种现象一般又称为污染物的降解。它是水体自净过程中最重要和最普遍的现象。它还为好氧分解和厌氧分解两种情况, 前者是在有氧条件下由好氧微生物进行的分解; 后者是在缺氧条件下由厌氧(或嫌氧)性微生物进行的分解, 在分解中产生甲烷、硫化氢、氨等臭气。

但是, 某些微生物也可以将水体中的一些有害物质转化为另一种毒性更强的有害物质, 例如汞的甲基化, 又称恶性转化。还可以通过食物链将污染物浓集千百倍以上, 从而危及生物和人体健康, 例如某些农药和重金属的富集, 这种富集作用又称为生物放大作用。总之, 微生物的恶性转化作用与食物链的富集作用, 是水环境污染研究的重要问题之一。

水体污染其结果如下:

(1) 供水水质恶化。水体污染破坏了水的功能。使城市和工厂供水水质得不到保障, 不仅增加水处理费用, 还可使产品质量下降, 腐蚀设备, 影响人体健康。污染的水灌溉农田可使作物减产、农产品质量下降以致不能食用、土质恶化等。

(2) 水中溶解氧下降, 水生生态平衡遭破坏。水中有机污染物分解耗氧使溶解氧下降, 甚至耗尽, 或水体有毒污染、热污染等均可造成水生生物无法生存、鱼虾死亡, 致使整个生态系统失去平衡。

(3) 低毒性转化为高毒性, 水质进一步恶化。这是因某些微生物的恶性转化作用和食物链的富集作用所致。

（二）各种水体的污染特点

河流、湖泊、海洋及地下水运动形态不同，环境条件也有差异，因而各类水体都具有不同的污染特点。

1. 河流污染特点

（1）污染物的扩散与混合。污染物进入河流，一方面受水流的推力，沿水流方向运动，流速愈大输送污染物也愈多。另一方面污染物在水中从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。在这两种运动共同作用下，污染物从排污口排出后先呈带状分布，直到一定距离后，才会达到全断面均匀混合。该距离的长短随河流流量、流速大小及河床、排污口的形式、位置而定。

河口受潮汐影响，污染物输送和扩散受海水顶托，停留时间长，往往污染严重。

（2）河水污染程度与径污比有关。河水的污染程度与河水的稀释条件有关，而河水的稀释条件可采用径污比进行估算（河流的径流量与污水流量之比称为径污比）。河流的流量大，稀释条件好，相应污染程度低，反之污染严重。一般排污量较稳定，而河水流量一年四季变化大。因此枯水季节可能污染最严重。但有时第一场暴雨径流，把长期积存在地面的灰尘、垃圾和农田有机废物带入水体，形成河水严重污染，以致出现死鱼现象。

（3）河水自净能力强。河流中的溶解氧一方面因有机污染物的分解被消耗，另一方面也因水流较快、与大气混掺作用强，大气中的氧能通过水体表面较迅速地溶解于河水中，增强了水体的自净能力。

河流污染对人的影响很大，可直接通过饮用水、水生生物，也可间接通过灌溉农田，危害人体健康。但因河水交替快、自净能力强、水体范围较小，其污染相对易于控制。

2. 湖泊、水库的污染

湖泊、水库是水交替缓慢的水体，水面广阔，流速小，沉淀作用强，稀释、混合能力较差。其污染还受风浪、地理条件和水库运用方式的影响。污染特点是：

（1）污染来源广、途径多、种类复杂。湖泊、水库大多地势低洼，通过暴雨径流汇集流域内的各种工农业废水、废渣和生活污水，其中农业径流包括灌溉回归水所含化肥、农药等污染物占有相当比重。因此面源污染往往超过点源污染。

（2）污染物的稀释和迁移能力弱。因湖泊、水库流速缓慢，污染物多在排污口附近沉淀、稀释，浓度逐渐向湖心减小，形成浓度梯度。仅在小湖泊或大湖的湖湾处因面积小、封闭性强，污染物在湖流和风浪作用下能与湖水均匀混和。

（3）水温分层影响水质。湖泊、水库的水温随季节明显变化，夏季出现分层现象，对水的化学和生物特性有重大影响。底部因水流停滞水温低，微生物活动因含氧量不足形成厌氧条件，使底层铁、二氧化碳、锰、硫化氢含量增加。

（4）易发生富营养化。因农业径流中的化肥——氮、磷等营养元素大量进入湖泊、水库，使水体发生富营养化现象。一般发生在宽浅型湖泊（水库）较多。

（5）对污染物的转化与富集作用强。湖泊、水库中水生动、植物多，水流缓慢，有利于生物对污染物形成的胶体微粒的吸收，通过生物系统食物链的作用，污染物不断被富集和转移。

3. 地下水污染

地下水流动一般都非常缓慢，因此地下水污染过程也较缓慢，且不易察觉。一旦地下水被污染，因埋藏深而难于治理。

地下水污染途径有直接与间接两种。前者是污染物直接来自污染源，这是主要途径；后者是污染物作用于其他物质，然后通过这些物质进入地下水形成污染。地下水污染方式大致有以下四种：

- (1) 间歇入渗，污染物随雨水或灌溉水间断地渗入蓄水层。
- (2) 连续入渗，由污水聚集地或受污染的地表水体，连续向含水层渗漏形成污染。
- (3) 越流型，污染物从已受污染的含水层转移到未受污染的含水层。
- (4) 径流型，污染物通过地下水径流进入含水层污染潜水层或承压水。

地下水污染后较难净化复原，应以预防为主，最根本的保护措施是尽量减少污染物进入地下水。

三、水体污染物质的主要来源

1. 水体污染源

引起天然水体污染的物质称污染物质，而向水体排放污染物的场所、设备和装置等（通常也包括污染物进入水体的途径）称水体污染源。各种水体及其循环过程中涉及的污染源类型很多。

2. 水体污染源的分类

从不同角度将水体污染源划分为如下不同类型。

- (1) 按水体类型分，有降水、地面水、地下水及海水等污染源。
- (2) 按形态分，有点、线、面及空间污染源。
- (3) 按稳定性分，有固定和移动污染源。
- (4) 按排放时间分，有连续、间断、瞬时等污染源。
- (5) 按污染物产生的来源分，有工业废水、农田排水、城市污水、大气降落物、工矿废渣及城市垃圾等污染源。
- (6) 从对环境污染的途径可分为直接污染与间接污染或转化污染的污染源。
- (7) 从环境保护的角度分，有自然污染源和人为污染源两大类。

所谓自然污染源是指因自然因素形成的污染源。如特殊的地质条件或火山爆发使某些化学元素大量富集；或者天然植物在腐烂过程中产生的某种毒物。这些物质进入天然水体使其盐分、微量元素或放射性物质偏高，造成水质恶化。人为污染源是指人类在生活生产活动中直接或间接把污染物排入水体而引起的污染源。如矿山开采、工农业废弃物、生活污水等。在当前水体污染主要是人为污染源引起的，这是环境保护工作研究和控制的主要对象。

3. 水体污染源简介

(1) 工业废水。工矿企业在生产过程中均会产生废水，其特点是量大、种类繁多、成分复杂、毒性强，而且难于净化和处理。例如钢铁、焦化和炼油厂排出含酚类化合物及氰化物；化工、化纤、化肥、农药、制革和造纸等工厂排出砷、汞、铬、农药等有毒物质；印染、造纸、制碱、矿山开采等工矿企业排出各种有色、异味、油类、泡沫和漂浮物的废水；动力工业排出高温废水等。工业废水是当前水体污染的主要来源。其排放方式集中，故称点污染源。

(2) 农田排水、降雨径流。在农作物生长过程中,对农田施用化肥、农药等,除被作物吸收、挥发及分解外,大部分残留在农田的土壤和水中,可随农田排水、降雨径流进入江河、湖泊而污染水体。挥发进入大气的那部分,可随降雨进入水体,造成污染。农田排水中的污染物来自较大范围的地区,故称为非点污染源。

(3) 城市污水。一般城镇人口密集,居民排出大量生活污水。生活污水成分复杂,多为需氧有机物、植物营养物(氮、磷)、病源微生物,一旦这些物质进入水体,可使水质恶化、传播疾病。生活污水中磷、硫含量高,在厌氧细菌作用下,使水体恶臭、水生生物绝迹。病源微生物进入水体往往引起传染病蔓延,危及人体健康。生活污水多通过下水道集中排放,亦称为点污染源。

(4) 大气降落物(降尘和降水)。大气中的污染物种类多,成分复杂,有水溶性和不溶性成分、无机物和有机物等。它们主要来自矿物燃烧和工业生产时产生的二氧化硫、氮氧化物、碳氢化合物以及生产过程排出的有害、有毒气体和粉尘等物质。这些污染物质可以自然降落或在降水过程中溶于水中被降水挟带至地面水体,造成水体污染。

(5) 工业废渣和城市垃圾。工业生产过程中所产生的固体废弃物随工业发展日益增多,其中冶金、煤炭、火力发电等工业排放量大。城市垃圾包括居民的生活垃圾、商业垃圾和市政建设、管理产生的垃圾。这些工业废渣和城市垃圾有时任意堆放在河滩、湖边、海滨或直接倾倒入水中,任水流冲洗或随城市暴雨径流汇集进入水体,造成水体污染。

四、水体中的主要污染物及其危害

水体中污染物质种类繁多,按污染性质可分为化学性污染物、物理性污染物和生物性污染物。一般按化学毒性可分为:①无机有毒物:主要指各类重金属(汞、镉、铬、铅等)及氰化物、氟化物等。②无机有害物:主要指酸、碱及一般无机盐和氮、磷等植物营养物。③有机有毒物:主要指苯酚、多环芳烃和各种人工合成的具有累积性的稳定有机化合物,如多氯联苯和有机氯、有机磷农药等。④有机有害物:主要指在水中容易被分解的有机化合物,如碳水化合物、脂肪、蛋白质等。⑤致病微生物:主要指水体中能引起人体疾病的各种病毒、病菌及寄生虫等。

现在按照国家已经颁布的各类水质标准中提到的主要污染物质归类分述如下。

(一) 需氧污染物及其危害

需氧污染物包括碳水化合物、蛋白质、油脂、氨基酸、脂肪酸、酯类等有机物质。它们可被水体中的微生物最终分解为简单的无机物,即二氧化碳和水等。在分解过程中需要消耗水中大量溶解氧(Dissolved Oxygen 简称DO),故称需氧有机物(或耗氧有机物)。需氧有机物一般没有毒性。水体中溶解氧含量与气压、水温有关,在正常大气压下、水温20℃时,水中所含溶解氧为9.17 mg/L。

由于水体中需氧污染物的组成比较复杂,在实际工作中一般采用下列指标表示水中需氧有机物的含量:

1. 生(物)化(学)需氧量(Bio-Chemical Oxygen Demand, 简称BOD)

生化需氧量表示水中有机污染物经微生物分解所需的氧量(以mg/L为单位)。生化需氧量愈高,表示水中需氧的有机污染物愈多,故BOD可反映水体中可被微生物分解的有机物总量。

有机污染物在好气条件下经微生物分解，一般分为两个阶段：第一阶段主要是含碳的有机物被转化成二氧化碳、水和氨，亦称碳化阶段。第二阶段主要是氨继续被转化为亚硝酸盐和硝酸盐，亦称为硝化阶段。其转化过程如图 2-2 所示。其中第二阶段耗氧影响较小，所以水体中生化需氧量通常只指第一阶段有机生物化学氧化所需的氧量。该阶段一般历时 20 天。但目前实际工作中均以五天作为测定生化需氧量的标准时间，简称五日生化需氧量（以 BOD_5 表示）。

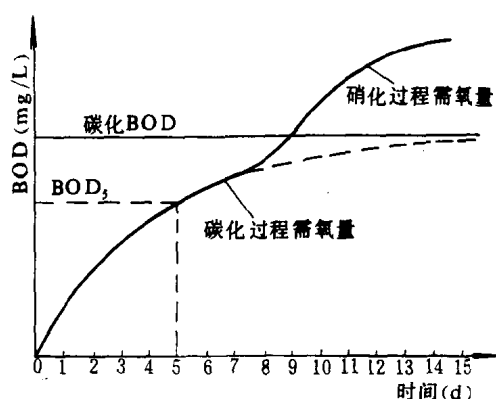


图 2-2 生化需氧曲线

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

化学需氧量是指用化学氧化剂氧化水中的有机污染物所消耗的氧量。化学需氧量越高，表示水中有机污染物越多，目前测定化学需氧量的常用方法主要有高锰酸钾法和重铬酸钾法。高锰酸钾法多量测污染不严重的水体，亦称高锰酸盐指数，以 mg/L 计。重铬酸钾法多量测污染较严重的水体，亦称 COD_{Cr} ，以 mg/L 计。这两种方法都不能反映出微生物氧化的那一部分有机物量。所以在研究有机污染物时，以采用生化需氧量指标较为合适。

3. 总有机碳 (TOC) 和总需氧量 (TOD)

总有机碳 (TOC) 是包括水体中所有的有机污染物的含碳量，也是评价水体中需氧有机污染物的一个综合指标，单位以碳的 mg/L 表示。

总需氧量 (TOD)，有机污染物中除含有碳外，还有氢、氮、硫等元素，当有机污染物全部被氧化时，除生成二氧化碳外还有水、一氧化碳、二氧化硫等。此时所消耗的氧量称为总需氧量，单位以氧的 mg/L 表示。

在天然水体中，一般生化需氧量在 $1\sim2\text{ mg/L}$ 之间。在污染水体中需氧污染物主要来自生活污水、牲畜污水及食品、造纸、制革、印染、焦化、石油化工等工业废水，其中生活污水是主要来源。

需氧污染物的危害主要是降低水中溶解氧。当不能满足鱼类要求时，它们力图逃离缺氧区；当溶解氧低于 1 mg/L 时，大部分鱼类窒息死亡；当水中溶解氧耗尽后，有机物将转入厌氧分解，产生硫化氢、氨和硫醇等难闻的气味，水色变黑，水质恶化，除了厌氧微生物之外，其他生物均不能生存。

(二) 水体的“富营养化”及其危害

“富营养化”是水体衰老的一种表现。通常是指湖泊、水库和海湾以及某些河流的水体内氮、磷等营养元素过量富集，使水体内生产力提高，某些特征性藻类（主要为蓝藻、绿藻）异常增殖，致使水质恶化的过程。水质呈富营养状态时，藻类成片成团地覆盖在水面上，若发生在湖面上称为“水华”或者“湖靛”，而发生在海湾或河口则称为“赤潮”。

在自然条件下，由于降雨对天气的淋洗和径流对地表岩石、土壤的淋溶和冲刷，使营养物质汇入水体的数量是很少的，因此富营养化过程极为缓慢。随着人类对资源的开发利用和居住城市化，过量的营养物质来自农田施肥、农业废弃物、生活污水及某些工业废水

(洗毛、制革、造纸、印染和食品等)，这些人为因素是水体富营养化的主要原因。例如北美伊利湖 25 年富营养化过程相当于 15000 年天然演变过程。

水体富营养化是水环境中普遍存在的水质污染现象。水中营养物质在微生物作用下，可分解成为水生生物直接吸收利用的形式，导致水生生物中的藻类大量繁殖，使鱼类生存空间变小，生物种群变得低劣。藻类的过度生长也造成水中溶解氧急剧变化：①夜间藻类的呼吸作用和藻类的死亡分解，会造成水体严重缺氧。②白天藻类在光合作用下产氧，使水体溶解氧出现过饱和，使鱼类生气泡病危及鱼类生存。此外，藻类死亡沉入水底，在厌氧条件下分解并释放出硫化氢等有害气体，使水质不断恶化。同时，在藻类残体腐烂、分解过程中，又将氮磷等植物营养物质重新释放进入水中，再供藻类利用，这样形成了氮、磷等营养物质在水体内部的物质循环。因此，处于封闭、半封闭状态的缓慢流动水体，一旦出现了富营养化，即使切断外界营养物质来源，水质仍很难恢复，这是水体富营养化的重要特征。表 2-1 列举了富营养化水体特征及危害。

表 2-1 湖泊演化过程的主要指标及其危害

	项 目	贫 营 养	中 营 养		富 营 养
			前 期	后 期	
主 要 指 标	BOD ₅ (mg/L)	<1	1~3	3~10	>10
	细菌 (个/L)	<100	100~10000	1 万~10 万	>10 万
	浮游生物密度 (m ³)	<1	1~3	3~5	>5
	叶绿素-a (μg/L)	<1	1~3	3~10	>10
	磷 (mg/L)	<0.001	0.001~0.005	0.005~0.01	>0.01
	氮 (mg/L)	<0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	>0.3
危 害	水道阻塞	×	×××	×××	×××
	恶 臭		××	×××	×××
	着 色		×	××	×××
	锰 危 害		××	×××	×××
	鱼 种		××	×××	×××
	死 鱼			×	×××

注 × ×× ×××表示危害程度由小到大，该表引自《水资源保护工作手册》P146。

水体中氮、磷含量的高低与富营养化程度密切相关，但两者不呈直线关系。目前国内外主要根据氮磷在水体中的含量来进行判断，表 2-2 和表 2-3 分别是美国托马斯和日本坂本两位学者对水体富营养化程度的划分，可供参考^[11]。

表 2-2 水体富营养化程度划分 (托马斯)

单位: mg/m³

富营养化程度	总 磷	无 机 氮
极 贫	<5	<200
贫~中	5~10	200~400
中	10~30	300~650
中~富	30~100	500~1500
富	>100	>1500

表 2-3 水体富营养化程度划分 (坂本)

单位: mg/m³

富营养化程度	总 磷	无 机 氮
贫 营 养	2~20	20~200
中 营 养	10~30	100~700
富 营 养	10~90	500~1300
流 动 水	2~230	50~1100

从上述表中可以看出，磷元素的作用远大于氮的作用，磷含量不很高时就可以引起水体的富营养化。

水体富营养化的治理，首先要严格杜绝水体营养物质的来源。按照李毕格提出的“Liebig 最小值定律”，即植物生长取决于外界供给它所需养分中数量最少的那一种。以此原则来控制水体富营养化速度。在实践中多采用控制水体中氮、磷元素含量的办法，尤其是磷的含量更是关键因素。因此修建截污与引污工程，拦截和疏浚营养物质，使不继续排入或滞留水体，是比较有效的措施。此外采取疏浚底泥、人工去除水草和藻类、引入贫营养水稀释及实行人工曝气等都是治理富营养化的措施，可根据实际情况采用。图 2-3 为华盛顿湖治理成功的实例。

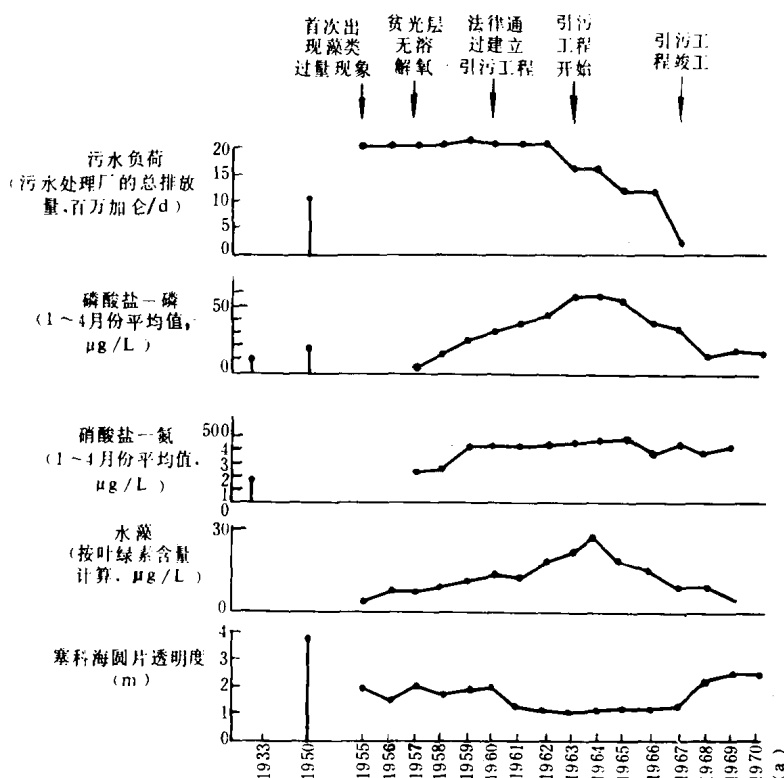


图 2-3 华盛顿湖富营养化的可逆过程

其中引污工程始于 1963 年；止于 1968 年 (Edmondson 1971)

(三) 水体重金属污染及其危害

重金属一般指比重大于 5、周期表中原子序数大于 20 的金属元素。从环境污染角度考虑，主要是指汞、镉、铅、铬以及类金属砷等生物毒性显著元素，也指具有一定毒性的一般重金属，如锌、铜、钴、镍、锡等。

水体中重金属来源：①重金属在地壳中分布极为广泛，通过岩石风化、火山喷发、大气降尘、水流冲刷和生物摄取等过程进入水体，但天然水体中本底含量均较低。②重金属作为有色金属在人类生产和生活中被广泛应用。通过开采、冶炼、加工制造等过程，排出废水、废渣造成对水体的重金属污染。

1. 重金属对水体污染过程

重金属与其他污染物不同，在水体中不能被微生物降解，只能发生形态间的相互转化和分散、富集过程，其主要与沉淀、吸附、氧化还原及络合和螯合作用有关，分述如下：

(1) 沉淀作用。重金属在水中可经水解反应生成氢氧化物，或与相应的阴离子生成硫化物、碳酸盐等，因其溶解度较小，使重金属污染物随水流的扩散范围有限，虽对水体自净有利，但大量沉集在排污口附近底泥中，成为重金属的次生污染源。

(2) 吸附作用。天然水体中含有丰富的胶体，能强烈地吸附重金属离子，这在很大程度上控制着重金属在环境中的分布和富集，限制了扩散范围。重金属吸附于悬浮物上可随水流迁移。

(3) 氧化还原作用。多数重金属元素化学价态变化广泛，能在较宽幅度内发生电子得失的氧化还原反应。使重金属在不同条件的水体中以不同价态存在，相应其活性与毒性效应也不相同。

(4) 络合与螯合作用。水体中存在许多天然与人工合成的无机配位体 (Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 OH^- 等) 和有机配位体 (腐殖质)，它们能与重金属形成稳定的络合物和螯合物并增大了在水中的溶解度，对重金属在水体中的迁移有很大影响。也可使已进入底泥中的重金属重新释放出来，形成次生污染源。

2. 重金属污染危害的主要特点

(1) 天然水中只要有微量重金属就可以产生毒性效应，一般重金属产生毒性范围大约在 $1\sim 10\text{ mg/L}$ 之间，毒性较强的金属如汞、镉在 $0.01\sim 0.001\text{ mg/L}$ 以上。

(2) 微生物不能降解重金属，相反水体中某些重金属在微生物作用下转换成毒性更强的化合物，如无机汞经微生物作用转换成甲基汞，毒性增大 100 倍。

(3) 生物体对重金属的摄取可经过食物链的生物放大作用，逐级在较高级的生物体内成千万倍地富集，并通过食物造成人体慢性中毒。

3. 常见几种重金属的污染及其危害

(1) 汞污染及其危害。在自然界中，大部分汞与硫结合成硫化汞 (辰汞)，广泛地分布在自然界中。汞在天然水体中的含量一般不超过 $0.1\text{ }\mu\text{g/L}$ ，在沙质底泥中小于 $0.01\sim 0.05\text{ }\mu\text{g/L}$ ，污染区汞含量可超出本底值上万倍。水体中汞主要来自制碱、塑料、电子等含汞工业排出的废水，煤、石油燃烧、汞冶炼和汞制品生产中排放含汞废气重新落入水体及农业生产使用含汞农药等。天然水中的汞一部分挥发进入大气，而大部分沉入底泥。底泥中的汞可直接或间接地在微生物作用下转化为甲基汞或二甲基汞。甲基汞易溶于水，因此又从底泥回到水中，水生物摄入甲基汞可在体内积累并通过食物链逐级富集，在鱼、鸟等高等动物体内富集程度很高，如图 2-4 所示。

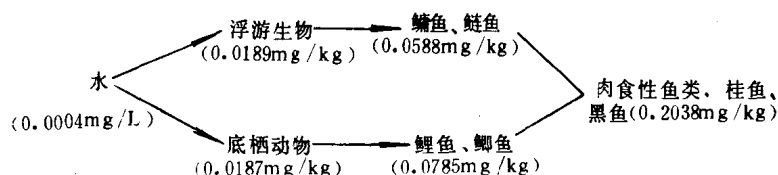


图 2-4 海洋微生物中汞的积累