

浙江省高等教育重点建设教材

环境水力学

董志勇 编著



科学出版社

www.sciencep.com

X52
11

浙江省高等教育重点建设教材

环境水力学

董志勇 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地阐述了环境水力学的基本概念、基本理论和最新研究成果,内容主要包括:环境水力学发展概况、水环境基本概念、迁移扩散理论、剪切流离散、射流、羽流、浮射流、水质模型、地下水污染模型、分层流、生态水力学等。为便于读者自学,文字力求写得通俗易懂,对一些数学处理给出了比较详细的推导过程。书末附有环境水力学常用术语中英文对照、人名中英文对照以及详细的参考文献,以便读者深入研究时参考。另外,每章末还附有一定数量的习题。

本书可作为水利类、环境类专业高年级本科生和研究生的教材,同时可供有关专业的学生、教师、科研人员及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境水力学/董志勇编著. —北京:科学出版社,2006

ISBN 7-03-017054-7

I. 环… II. 董… III. 环境水力学 IV. X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 026950 号

责任编辑:胡 凯/责任校对:李奕莹

责任印制:安春生/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年4月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006年4月第一次印刷 印张: 14 3/4

印数: 1—2 500 字数: 282 000

定价: 32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

前 言

环境水力学(environmental hydraulics)是于 20 世纪 70 年代发展起来的一门交叉学科,其内涵较为丰富,涉及的知识面也较广,主要包括污染物在地表水和地下水中的扩散、迁移及转化规律以及水生物与水流之间的相互关系等。它是水力学与环境科学、环境工程、水利工程、生态学等学科相互交叉、相互渗透的产物,是进行水质评价、水质预报、水生态修复等水环境问题的理论基础。

本书较为系统地阐述了环境水力学的基本概念、基本理论以及基本的研究方法。在叙述上,力求深入浅出、重点突出。主要思路为:从点源污染到非点源污染;从瞬时源到连续源;从基本的动量射流到羽流、浮射流;从最基本的费克扩散到紊动扩散、随流输运及剪切离散;在污染物的类型上,由示踪物到有机污染物,进而到难降解物质;从地表水污染到地下水污染;在污染物迁移的形式上,重点讲述扩散、离散及转化等理论;在问题的数学描述上,给出物理概念清晰的理论解。此外,以较大篇幅介绍了与水环境密切相关的分层流理论以及水生态环境中的水力学问题,即生态水力学(ecohydraulics)。为适应不同层次读者使用和方便教学,对书中常用的外国人名译成通俗的中文译名,并在书末附有人名中外文对照。此外,书末还附有环境水力学常用术语中英文对照和详细的参考文献,以便读者深入研究时参考。为帮助读者理解所学内容,书中列举了一些例题,每章末还附有一定数量的习题。

本书的出版得到“浙江省高等教育重点建设教材出版基金”的资助,谨此表示衷心的感谢。作者的多位国内外同仁曾惠赠一些宝贵的资料或给予热情的帮助和鼓励,在此谨向他们表示真诚的谢意。作者还要特别感谢赵玉英女士,在本书的写作和出版过程中,她帮助完成资料整理、绘图、电子排版及校对等工作。最后,感谢在本书写作和出版过程中其他所有给予关心、支持和帮助的人们。

在本书写作过程中,作者虽力求审慎,但由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2005 年 3 月于杭州

E-mail: dongzy@zjut.edu.cn

目 录

前言	
第一章 绪论	1
1-1 环境水力学的形成与发展	1
1-2 水环境基本概念	9
1-3 本课程概貌	14
习题	15
第二章 迁移扩散理论	17
2-1 费克定律与扩散方程	17
2-2 瞬时源扩散	19
2-3 连续源扩散	23
2-4 有限空间的扩散	27
2-5 分子扩散的随机游动理论	28
2-6 紊动扩散的拉格朗日法	31
2-7 紊动扩散的欧拉法	34
2-8 岸边排放与中心排放污染带的计算	36
习题	40
第三章 剪切流离散	42
3-1 管道剪切流离散	42
3-2 明渠剪切流离散	47
3-3 非恒定剪切流离散	50
习题	54
第四章 射流、羽流和浮射流	56
4-1 紊动射流基本方程	56
4-2 紊流的半经验理论	58
4-3 自由紊动射流的一般特性	61
4-4 平面紊动射流	63
4-5 圆形紊动射流	68
4-6 羽流	72
4-7 圆形浮射流	79
4-8 二维浮射流	89

4-9 浮射流的量纲分析法	95
4-10 多孔扩散器水力计算	99
习题	104
第五章 水质模型	105
5-1 河流 BOD-DO 耦合模型	105
5-2 河流综合水质模型	111
5-3 湖泊水质模型	115
5-4 重金属污染模型	122
习题	126
第六章 地下水污染模型	128
6-1 概述	128
6-2 地下水污染的随机模型	129
6-3 地下水污染的黑箱模型	130
6-4 典型弥散问题的解析解	132
习题	140
第七章 分层流	141
7-1 分层渐变流基本方程	141
7-2 分层均匀流	143
7-3 分层非均匀流	146
7-4 内波运动与交界面的稳定性	150
7-5 选择性取水	153
习题	162
第八章 生态水力学引论	163
8-1 鱼类的生态特性	163
8-2 鱼道水力设计	177
8-3 过鱼孔出流特性	189
习题	210
参考文献	211
附录 1 地面水环境质量标准	218
附录 2 常用术语中英文对照	220
附录 3 人名中外文对照	229

第一章 绪 论

1-1 环境水力学的形成与发展

一、环境水力学形成的背景

人类社会需要多种资源,水是最重要的自然资源。地球上各种形态的水体总共约有 1.36×10^{10} 亿立方米,其中海洋储量达 1.32×10^{10} 亿立方米,占全球总储量的 97.24%,而陆地上的各种水体为 37506 万亿立方米,仅占全球水体储量的 2.76%。陆地水储量中,两极冰盖和高山冰川又占 77.3%,为 29000 万亿立方米。对人类生产和生活有利用意义的水资源为河流、湖泊及浅层地下水,全球这部分水量约有 38.83 万亿立方米,约为总淡水量的 0.1%。

我国水资源总量为 2.8 万亿立方米,居世界第六位,但人均占有量仅为世界人均占有量的 1/4,可见我国水资源并不丰富,更由于地区分布不均,年内分配不同、年际变化大,加之水体污染严重,大大降低了水资源的可利用率。

水不仅是维持地球上一切生命生存的根本,还是人类社会发展的至关因素。人类总是习惯于沿着江河湖海定居繁衍,因为这些地区比在内陆、山区、丛林和沙漠有更大的生存机会。但是,随着工业的发展及人口的膨胀,人类正面临着全球范围的水污染、生态恶化和灾害频生的严峻形势。如今,全球大部分水体正遭受着人类活动造成的各种破坏。《寂静的春天(Silent Spring)》一书较早地描述了人类活动带来的环境问题,作者雷切尔·卡森女士(Rachel Carson)以寓言形式描写道:从前,在美国中部有一座小镇,这里的所有生物与周围环境相处得很和谐。……,但从那时起,勃勃生机的春天变得万籁俱寂——听不到绿化丛中歌唱的小鸟、看不见溪流中戏水的鱼虾,唯有黑臭的河水……

1. 海洋环境问题

全球共有 35 个主要海域,有的与大洋相连,有的由陆地环绕。波罗的海、地中海、黑海、里海、白令海、黄海等海域在不同程度上反映出 35 个海域遭受破坏的状况。

古代,黑海以丰富的鱼类资源、温和的气候和重要的战略地位而闻名于世。位于黑海之滨的君士坦丁堡是拜占庭帝国的首都,是东西方交往的门户,是人类文明的主要中心之一。但是近几十年来,这个美丽的海域却遭到了肆意破坏。最严重的问题是水体富营养化,这是由于流入黑海的各条河流把农田施用的化肥、城市生

活污水带入海中,致使海藻和细菌迅速繁殖,在水面形成厚而密集的漂浮层(赤潮),破坏了黑海水体的自然生态平衡。黑海的主要污染源是从西北部流入黑海的多瑙河、德涅斯特河等。经多瑙河流入黑海的污染物主要是化肥和中欧、东欧地区 8000 多万人口的生活污水。多瑙河每年向黑海排放大约 60 万吨磷、340 万吨氮;流经乌克兰、摩尔多瓦产粮地区的德涅斯特河则把大量的硝酸盐、磷酸盐带入黑海。黑海 90% 的水体已经变成动植物难以生存的死水,其中部、南部水域的深层水中含有一种有毒物质,并且死水正从下向上逐步扩展,黑海正面临窒息而死亡的威胁。

众所周知,黄海是由于黄河挟带大量泥沙流入渤海后形成的。数千年来,黄海接纳的是黄河的泥沙,如今除接纳大量泥沙之外,还接纳黄河流域和沿海地区排放的污染物,使得水栖和陆栖动物的生存环境日益恶化。据《1989 年中国沿海环境质量年鉴》统计,经黄河流入渤海的镉、汞、铅、锌、砷、铬等重金属达 750 吨,另外还有 2 万吨石油。排入黄海的污染物负荷则比渤海高一倍以上。黄海的污染物主要沉积在许多海洋生物赖以生存的海床上。据 1981~1984 年间进行的监测结果显示,螃蟹、虾等甲壳类动物体内的镉含量增加了 2 倍,鱼类、软体动物体内铅、铜的含量分别增加了 1~3 倍。1989 年的监测结果表明,蛤蜊、牡蛎等贝壳类动物体内的汞含量超过允许含量的 10 多倍。与黄海相连的各条河流的河口、海湾、湿地,大部分已受到污染,对渔业生产造成了严重影响。以胶州湾的青岛沿海为例,1963 年共有 141 种海洋动物生活在沿海水域,到了 1988 年仅剩下 24 种。

在地处北欧斯堪的纳维亚半岛上,纵横交错的河流小溪经瑞典、挪威汇入波罗的海。它们并不像世界上多数入海河流那样流经人口稠密、土地得到充分开垦的地区,而是流经寂静的带有原始色彩的森林地区。正是这些森林地区的纸浆厂、造纸厂成了危及波罗的海的污染源。造纸厂在对纸张做漂白处理过程中,排放出大量的有机氯化物,这类化合物不溶解于水,但可溶解于脂质,并且能聚积于动物和鱼类的脂肪组织中。瑞典、芬兰的纸浆及纸张产量占世界总产量的 10%,两国每年排放的氯化物约有 30 万~40 万吨,其中大部分流入波罗的海。已有研究表明,这种化合物是致癌物质,并能导致动物生育和内分泌方面的疾病。同毗邻的北海鱼类相比较,波罗的海鱼类体内的氯化物含量竟然高出 8~10 倍!早在 20 世纪 50 年代末,在瑞典沿海就发现大批海鸥、海豹和水貂因氯化物致死。海洋生物学家的研究表明,波罗的海各种海洋动物除了数目急剧减少和濒临灭绝的危险之外,还由于体内有机氯含量过高而出现先天性缺陷,如海豹的颅骨极脆,一碰就碎;约半数海豹因生殖器官畸形而失去繁殖能力等。

大多数海域只是部分被陆地包围,但位于黑海以东约 500 公里的里海则完全被陆地所包围。几百年来,势力强大者为了控制里海沿岸具有战略意义的河流、港口而激战。如果说里海南部流域是因为有石油而具有重要的战略意义,那么其北

部流域则是由于有丰富的农业资源、水资源而具有战略意义。这个地区生产的粮食占前苏联各共和国粮食总产量的 1/5, 工业产值占 1/3。伏尔加河是里海的主要污染源。1989 年, 经伏尔加河排入里海的污水达 4000 万吨, 仅石油化工厂每年就向里海排放近 7 万吨工业废水。因此, 里海的渔业资源濒临崩溃, 鲈鱼、狗鱼的捕获量 30 年来下降了 96%, 但是下降幅度最大的当属鲟鱼的鱼子产量, 如今从伏尔加河洄游到里海产卵的鲟鱼已大大减少, 素有“里海黑珍珠”美称的鱼子酱, 已成为历史。

近海及海湾石油的开采、油轮运输、炼油工业废水排放及油轮发生意外事故等, 会使海域遭受油污染。原油是烷烃、烯烃和芳香烃的混合物, 油品进入水体后, 先成浮油, 后成油膜以及一些非碳氢化合物溶解而成的乳化油。油膜仅 $1\mu\text{m}$ 厚就会阻碍水面蒸发和氧气进入水体, 影响水循环及水中鱼类的生存。石油在水体中可经过光化学氧化作用或生物氧化作用而分解。因石油中所含硫、砷、烷烃、芳香烃等不同, 其氧化速率变化较大, 并随天气或海水温度而变化。这会产生一些微生物及致癌物, 对生物造成危害。漂浮在水面上的油层还会在风力作用下随流扩散和运移, 致使海滩环境恶化, 休养地、风景区被破坏, 鸟类栖息环境也遭破坏。

2. 河流污染问题

河流是陆地上最重要的水体, 城市和大工业区大都沿河建立, 依靠河流提供水源, 便于原料和产品的运输, 同时还将河流作为废水排放的场所。因此, 在工业地区和人口密集城市的河流大多受到不同程度的污染。其污染状况主要有以下几个特点:

(1) 污染程度随径流变化

河流污染程度可用径污比表示, 即河流的径流量与排入河水中的污水量之比。若径污比大, 稀释能力就强, 河流的污染程度就轻, 反之就重。河流的径流量随时间、季节等而变化, 因此污染程度也就随之变化。

(2) 污染影响范围广

河水是流动的, 输运能力强, 若上游遭到污染, 就很快影响到中下游。由于污染物对水生物的生活习性(如鱼类洄游)有影响, 若一段河流受到污染, 会影响到该河段下游的河流环境。因此, 河流污染影响范围不限于污染发生区, 还殃及下游地区, 甚至影响到海洋。

河流是主要的饮用水源, 河水中的污染物可以通过饮用水直接危害人类的健康。不但如此, 河流中的污染物还可以通过食物链和河水灌溉农田造成间接危害。

(3) 河流的自净能力较强

废水或污染物进入河流后, 污染与自净过程就同时开始。距排放口近的水域, 污染过程是主要的, 表现为水质恶化, 形成严重污染区。而在相邻的下游水域, 自

净过程得到加强,污染强度有所减弱,表现为水质相对有所好转,形成中度或轻度污染区。在轻度污染区下游水域,自净过程是主要的,表现为废水或污染物经河水物理、化学或生物化学作用,污染物或被稀释或被分解或被吸附沉淀,水质恢复到正常状态。

3. 河口污染问题

入海河口往往有三角洲和冲积平原,土地肥沃,人口稠密,工农业生产比较发达,排放污染物也较集中。入海河口的河段由于流量大,比降小,更受到海洋潮汐的影响及台风暴雨的袭击,容易发生海潮倒灌、河水漫滩,使工农业生产受到损失,所以河口的治理与防治是很重要的课题。例如珠江三角洲河口区有大小排污企业 6200 多家,排污量占全流域的 37%,河口会潮点有 40 多个,受潮汐影响污水回荡不易排出,污染比较严重。目前南海油田的开发,深圳、珠海等经济特区的建立,乡镇企业的迅速发展都使珠江三角洲的水质进一步恶化,政府及水资源管理部门已高度重视,正积极开展调查研究,采取对策和措施进行综合治理。

入海河口是河流与海洋的过渡段,是河流与海洋两种动力相互作用、相互消长的区域。河流动力是指水流和泥沙的下泄,海洋动力是指潮汐的作用。当然,风力也要起作用,但在一个狭长的河口,潮汐起主要的作用;而在宽阔的河口,风力引起的流动将是一个重要的因素。这些动力因素的不同组合使河口的水文情势及污染物的迁移扩散较为复杂,具有明显的独特性。

众所周知,海水是咸水,河水是淡水。河口区中咸淡水的盐度、密度、含沙量不同,混合之后会影响河口的动力状况和沉积情况。咸淡水的混合程度主要取决于涨潮期内进入河口区的淡水量与涨潮量的比值,即混合指数 MI (mixing index) 的大小。若 $MI \geq 1.0$, 则咸淡水分层清楚,常出现在弱潮河口,河道径流量大,淡水从上层流向海洋。若海水盐度大,密度也大,则海水以楔形体沿底层向河口上游延伸,即盐水楔。盐水楔顶端附近是河口区淤积严重地带,因为咸淡水相遇流速减小,导致物质沉积。若 $MI \leq 0.1$, 潮汐作用占主导地位,咸淡水之间混合强烈,断面上的等盐度线近乎垂直,但在纵向上盐度梯度仍然存在,盐度向海逐渐增大。这类河口一般比较宽阔,呈喇叭形(如钱塘江河口)。若 $0.1 < MI < 1.0$, 即介于弱混合型与强混合型之间,即为缓混合型,则咸淡水之间无明显的交界面,但上层与底层盐度仍有显著的差别。当潮汐作用增大时,底层咸水向上混合,上层淡水向下混合,上层的流量从陆向海增大,而下层的流量由海向陆减小,形成河口的环流。

进入河口区的泥沙一般粒径很小。由于化学作用,细颗粒泥沙在淡水中发生电离现象,使其带有负电。颗粒间负电相斥,导致泥沙分散,呈胶体状,很难在重力作用下下沉。而海水是含有电解质的液体,即含有正离子,表面带有负电荷的泥沙胶粒与海水中的离子发生离子交换,致使部分泥沙颗粒之间产生引力,从而颗粒变

大,当紊动垂向速度小于其沉降速度时,泥沙下沉。这种物理化学现象便是絮凝作用,是入海河口泥沙沉积的重要因素。

4. 湖泊污染问题

湖泊与河流有着不同的水文条件,湖水流动缓慢、蒸发量大,有相对稳定的水体,且具有调节性。因此,流入和流出水量、水质、日照和蒸发的强度等因素影响着湖泊的水质。许多水较深和容量较大的湖泊出现水温分层,水质成分也呈现不均匀性。下面简要叙述湖泊污染的主要特点:

(1) 湖泊污染源广、途径多、种类多

上游和湖区的人流水道可携带所流经地区厂矿产生的工业废水和生活污水;湖区周围农田、果园土壤中的化肥、残留农药及代谢产物等污染物通过农田排水和地表径流进入湖泊;湖中生物(水草、鱼类、藻类和底栖动物)死亡后,经微生物分解形成的残留物也会污染湖泊。当流域上大量施用化肥时,还能造成氮、磷等元素进入湖泊,使藻类大量繁殖,形成“富营养化”现象。

(2) 湖水稀释和输运污染物能力弱

湖泊水域广阔、蓄水量大、流速缓慢,污染物进入后不易迅速被湖水稀释达到充分混合,容易沉入湖底,也难于通过湖水流动向下游输运。在洪水季节,由于有滞洪作用,稀释与输运物质能力不如河流那样强。此外,流动缓慢的水面还使水的复氧作用降低,因此对有机物的自净能力也减弱了。

(3) 湖泊对污染物的生物降解、积累和转化能力强

湖泊是孕育水生动物、植物的天然场所。流动缓慢的湖水有利于湖泊生物对微小物质的吸收。不少生物能富集铜、铁、钙、硅、碘等元素,可比水体原来所含浓度大数百倍、数千倍甚至数万倍。在湖泊中,污染物除可直接进入生物体外,还可通过食物链不断富集和转移,如 DDT 及其分解物可通过水→藻→虾→昆虫→小鱼而进入鸥体,鸥体内的浓度则比水中的浓度大 100 万倍以上。有的生物能对污染物进行分解,如酚可通过藻类、细菌或底栖动物的新陈代谢水解为二氧化碳和水,从而有利于湖水的净化。有些生物还能把一些毒性不强的无机物转化成毒性很强的有机物,如无机汞可被生物转化为有机的甲基汞,并在食物链中传递浓缩,使污染危害加重。

5. 水库污染问题

近 20 年来,我国大多数水库经常遭受“白色污染”的冲击,在我国南方的一些水库,还常常受到水葫芦污染的威胁。

水葫芦,学名凤眼莲,是一种水生植物,原产于南美洲,20 世纪 30 年代作为猪饲料引进,并作为观赏和净化水质植物推广种植。水葫芦生命力极强,呈几何级数

疯长。水葫芦的主要危害为：大量生长繁殖后覆盖水面，影响船舶航行及旅游业的发展，堵塞水电站进水口，阻碍汛期抗洪，降低水中溶解氧，危及鱼类生存等。另外，在水葫芦生长区易形成优势物种，导致其他水生植物减少。

“白色污染”主要指泡沫塑料、矿泉水瓶、塑料袋等漂浮物。白色污染物在水库坝前的堆积，会降低水电机组的发电效益，影响工作门、检修门的启闭。1998年大洪水期间，葛洲坝二江电厂坝前的白色垃圾曾形成一道堆积厚度达2~4m的屏障，严重堵塞了葛洲坝水电机组的进水口，迫使葛洲坝电厂停机51台次，损失电量5651万度。

6. 地下水污染问题

大气降水到达地面后，通过地表渗透到地下的水即为地下水。从广义上讲，地下水是指埋藏于地表以下松散土层和固结岩层中的水。它有固态、液态、气态三种形式。固态水仅当土壤或岩石的温度在冰点以下时才存在；气态水滞留于土壤、岩石的孔隙中，成为土壤空气的组成部分；液态水在重力和毛管力作用下存在于土壤、岩石的孔隙中，在分子力的作用下，还有吸附在土壤颗粒表面的水，称为结合水；还有包含于某些矿物中，构成化学状态的结晶水。各种状态的水均能在一定条件下相互转化。

地下水是水文循环中的一个重要环节，常以地下渗流方式补给河流、湖泊和湿地，或者以地下径流方式直接注入海洋；在上层土壤中的水分通过蒸发或植物蒸腾进入大气。地下水是地球上的一种重要水资源，工矿、城市和农业灌溉常常要用到它。其水质的好坏，是否受到污染对使用很有影响。下面着重叙述地下水污染的原因和特点。

(1) 地下水污染的原因

地下水污染的主要原因有：工业废水和生活污水通过各种途径，特别是渗坑、渗井排入地下，污染地下水；工业废渣及城市垃圾经雨水淋漓渗入地下；水源防护带不良；不合理的污水灌溉及化肥、农药的长期使用；人为因素如人工回灌、井壁渗漏、地下水超采等均能导致地下水污染。

(2) 地下水污染的特点

(A) 污染过程缓慢

污染物在地表水下渗过程中不断受到各种阻碍，如截留、吸附、分解等，进入地下水的污染物数量随之减小，通过土层越长，截留的越多，因此污染过程是缓慢的。有些在地表水中容易分解的污染物，进入地下水后难以消除，并且发生大范围的影响，所以防止地下水污染十分重要。

(B) 间接污染

地表水污染物在下渗过程中与其他物质发生作用,被携带进入地下水,造成间接污染。如地表水中的酸碱盐类等在下渗过程中使岩层中大量钙镁溶解进入水中,因而地下水硬度增高。又如地表水中的有机物在下渗过程中被生物降解,溶解氧减少等等。

(C) 水文地质条件影响大

由于地下水埋藏在地下,在不同类型的水文地质条件下,污染原因、污染程度、污染分布范围各异,分别表现出不同的特征。按水文地质特征我国城市可划分为不同的类型,如山前冲、洪积平原类型,河流阶地或山间谷地类型,滨海类型,岩溶类型,内陆类型等。在保护地下水资源工作中要区别对待,因地制宜地采取防治措施。

7. 热污染问题

热污染是一种能量污染。热电厂、核电站及冶炼等使用的冷却水是产生热污染的主要来源。这种温度升高的水,排入天然水体后,引起水温上升,并形成热污染带。

水温的升高,会降低水中的溶解氧含量。温度增加,将加速有机污染物的分解,增大耗氧作用,也会使水体中某些毒物的毒性提高。这对鱼类的影响很大,甚至引起鱼类死亡。不同地带的鱼类对水温的适应有一定的变化幅度,如热带鱼类适于 $15\sim 32^{\circ}\text{C}$,温带鱼类适于 $10\sim 22^{\circ}\text{C}$,寒带鱼类适于 $2\sim 10^{\circ}\text{C}$ 的范围。鱼类耐温的程度也随鱼种而变化。此外,鱼类在某种温度下虽仍能存活,但可能停止繁殖。其原因可能是缺乏产卵的适宜条件,或限制了幼鱼的存活。在温度、氧浓度和有毒物质之间有着复杂的相互影响。接近耐温限度的上下限时,鱼类抵抗氧浓度的减少以及对付溶解性污染物的能力就显著降低。

水温的升高还破坏生态平衡的温度环境条件,加速某些细菌的繁殖,助长水草丛生,厌气发酵、恶臭。

天然水体一般都含有广泛的藻类品种,绿藻、蓝绿藻、棕藻、红藻、黄绿藻等都可能出现。由于不同的藻类族或科的生产率呈现不同的亲温性,因而在水环境中,随着温度的升高,某一类藻可能替代另一类藻。依此概念,可知一种藻类群落对温度的反应实质上是一个连续体,在由一群优势藻类转变为另一群优势藻类的过程中,其间相应地出现一个迟滞段。

总之,热水的排放,使得水体温度上升,对物理过程和生物过程都有重要的影响,从而对水质引起一定的变化。

8. 城市水环境问题

在社会发展进程中,城市已成为经济、政治、科学、文化的中心。世界人口越来越向城市集中,城市规模也越来越大。在某种程度上,城市化水平的高低成为现代化水平的一个重要标志。近 20 年来,我国城市化的进程大大加快,目前全国的城市化水平为 31%,到 2010 年将为 45%,预计到 2020 年将达到 60%左右。城市化进程加快的重要特征是城市人口膨胀、地表不透水面积增加。这使得城市资源、环境等各方面全面紧张,尤其是城市水环境问题更为突出。城市人口稠密,垃圾量大,加之城市大部分区域由原来的透水性地面变成不透水地面,使降雨径流响应时间缩短、径流系数显著提高,加剧了点源污染和面源污染,从而使城市水环境严重恶化。

二、环境水力学的发展

由上小节知,伴随着人类的经济活动,大量有害于人类和其他生物生息的生活污水、工业废水等未经充分处理而直接排入河流、湖泊、海洋和土壤,使地表水和地下水等天然水体受到严重污染,从而又将制约着人类社会的可持续发展。因此,水环境保护和水资源的可持续利用,已成为当今世界面临的主要任务之一。环境水力学(environmental hydraulics)就是适应水环境保护的需要而发展起来的,于 20 世纪 70 年代已逐步形成为水力学的一个重要分支学科,同时又是一门交叉学科,其内涵较丰富,主要包括污染物在水体中的扩散、迁移及转化规律以及水生物与水流之间的相互关系等。她是水力学与环境科学、环境工程、水利工程、生态学等学科相互交叉、相互渗透的产物,是进行水质评价、水质预报、水生态修复等水环境问题的理论基础。

环境水力学产生 30 多年来,其发展速度是惊人的,无论从深度还是广度,都十分迅速。国际水利研究协会(International Association for Hydraulic Research, IAHR),成立了环境水力学组,中国水利学会水力学专业委员会也成立了环境水力学组。在国外,传统的土木工程系纷纷更名为土木与环境工程系,增设了与环境有关的课程,如环境水力学、水环境数学模型等。国内许多大学、科研单位设立了环境水力学研究机构,开始招收环境水力学研究方向的硕士、博士学位研究生。实际上,我国对环境水力学中的一些课题,诸如火电厂的冷却水问题(水利水电科学研究院 1959)、河口的盐水入侵问题(南京水利科学研究所 1964)等,早在 20 世纪 50~60 年代就开始进行了研究。随着我国工农业的迅速发展以及城市化进程的加快,水环境保护问题也愈加迫切,因此,自 20 世纪 70 年代起,对环境水力学的各个领域,都相继开始进行研究。为了适应环境水力学研究的蓬勃发展,IAHR 每两年要召开一次环境水力学国际研讨会,并出版环境水力学会议论文集;中国水利学

会水力学专业委员会每两年也召开一次全国性的环境水力学学术会议,及时了解学科发展动态和方向,增进国内同仁的学术交流,正式出版环境水力学会议论文集。

近 30 年来,国际上权威性的水力学刊物,如 IAHR 的《Journal of Hydraulic Research》, ASCE(美国土木工程师学会, American Society of Civil Engineers)的《Journal of Hydraulic Engineering》等增加了环境水力学方面的文章, ASCE 新增了《Journal of Environmental Engineering》, IAHR 在《Journal of Hydraulic Research》中新增了环境水力学专辑。与此同时,国内相应刊物中环境水力学方面文章的比例也大大增加。随着环境水力学的进一步发展,我国相继出版了几本环境水力学方面的教材,较早的有香港大学李行伟(Joseph Hun-Wei Lee 1981)的《Theory of Buoyant Jets and Its Environmental Applications》、成都科技大学赵文谦(1986)的《环境水力学》、河海大学张书农(1988)的《环境水力学》、武汉水利电力大学徐孝平(1991)的《环境水力学》、清华大学余常昭(1992)的《环境流体力学导论》等。另外,还出版了与环境水力学相关的一些著作,如西安理工大学沈晋、沈冰等(1992)的《环境水文学》、武汉水利电力大学李炜、槐文信(1997)的《浮力射流的理论及应用》以及李炜(1999)主编的《环境水力学研究进展》等。在国外,如德国卡尔斯路赫(Karlsruhe)大学罗迪(W. Rodi 1982)主编的《Turbulent Buoyant Jets and Plumes》,德国斯图加特(Stuttgart)大学 W. 金士博(Kinzelbach 1987)的《水环境数学模型》,美国路易斯安那(Louisiana)州立大学辛格(V. P. Singh)和瑞士联邦理工学院(Swiss Federal Institute of Technology)哈格(W. H. Hager 1996)主编的《Environmental Hydraulics》等。

1-2 水环境基本概念

一、点源污染与非点源污染

由人类活动所产生的污染物给地表水造成的污染可大致分为点源污染和非点源(面源)污染。

1. 点源污染

点源污染又可进一步分为连续点源污染和瞬时点源污染。工业废水、城市生活污水的排放是典型的连续点源污染源,如位于富春江上游的某造纸厂,每天向富春江排放 1000 吨污水。瞬时点源污染,如江都市一油轮在京杭大运河泄漏 350 吨 90# 汽油;2002 年 12 月 27 日,一艘装满高浓度氯化钠的驳船在武汉长江二桥附近水域突然断裂,驳船内的 350 吨高浓度氯化钠则全部流入长江;2001 年 9 月 4 日,一安徽籍船舶往湖北武穴市运送工业用硫酸,行至长江武穴水域三八闸处时沉

没,船上所载的 158 吨硫酸全部溢出倾入江中,造成江面污染;2002 年 12 月 11 日,一辆大货车在广西金秀瑶族自治县七建乡至三角乡途中翻下约 60 米高的山坡滑入河道,车上装载的 100 桶共 20 吨三氧化二砷(俗称砒霜),有 33 桶(约 7 吨)跌入河道,其中 30 桶不同程度的破损,少量砒霜散落河水中。

工矿企业在生产过程中所排放的废水、污水、废液等都通称为工业废水。工业废水是水污染的主要污染源。它的特点是量大、种类繁多、成分复杂、毒性强、净化处理也较困难。按其成分大体可分为三大类:

(1) 含无机物的废水:包括冶金、建材、化工无机酸碱生产的废水。

(2) 含有机物的废水:包括食品工业、塑料工业、炼油和石油化工以及皮毛工业的废水等。

(3) 含有大量的有机物,同时又含有大量无机物的废水:如焦化厂、氮肥厂、合成橡胶厂、制药厂、制革厂、造纸厂、人造纤维厂等排出的废水。

随着城市化进程的加快,城市生活污水的排放量越来越大。其来源除家庭生活污水外,还有各种企事业单位等排出的污水。一般所谓城市污水是指排入城市污水管网的各种污水的综合,有生活污水,也有一定量的工业废水。

2. 非点源污染

非点源污染包括农业非点源污染和城市非点源污染。农田施用的化肥、农药除被农作物吸收一小部分外,大部分残留在农田的土壤中,然后随农田排水和降雨径流进入河流、湖泊,对水体造成污染。随着现代化农业和畜牧业的发展,特别是大型饲养场的增加,各种废弃物的排放,也会造成河流、湖泊等水体的污染。城市非点源污染包括工厂排放的煤烟、机动车辆排放的废气、街道粉尘、各种生活垃圾、工业废弃物、重金属、杀虫剂、车辆轮胎磨损产生的碎屑、车辆漏油和废机油、建筑材料以及各种有害有毒物质等。这些污染物平时悬浮在大气中或散布在城区街道和建筑物上,降雨时则随径流运动,汇入水体造成污染。

二、水质度量指标

1. 污染物浓度

评价水环境质量时,污染物在水中的浓度是一个重要的指标,常用 mg/L, ppm, ppb 来表示。ppm 是英文 parts per million 的缩写,意为百万分之一。看起来像是非常小的数量,但其效力却如此之大,以其微小药量就能引起体内的巨大变化。在动物实验中,发现百万分之三,即 3ppm 的药量能阻碍心肌里一个重要酶的活动,仅 5ppm 就能引起干细胞的坏死。

2. 溶解氧

顾名思义,溶解氧指溶解在水中的氧,以 DO (dissolved oxygen)表示,它是衡量水质的一个重要参数。因缺少氧的水一般含有有机物质较多,通过测定溶解氧可间接求出水被有机物质污染的程度。

在一定温度和压力下水能溶解氧气的最大值称为饱和溶解氧,它与水温和压力有关,水温越低,饱和溶解氧越大;在同一温度下,饱和溶解氧随水压力增大而提高。图 1-1 是在标准大气压下水的饱和溶解氧 O_s 随温度 T 的变化关系。

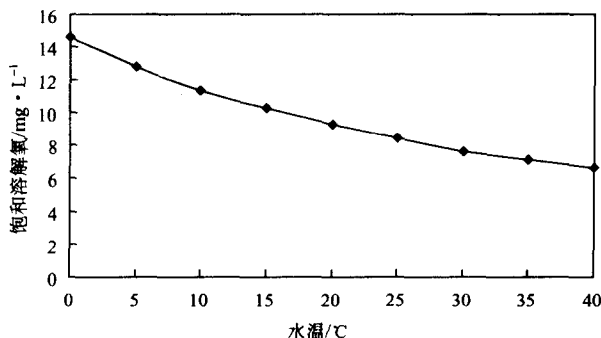


图 1-1 标准大气压下水的饱和溶解氧

标准大气压下饱和溶解氧亦可按下面公式计算:

$$O_s = 14.54 - 0.39T + 0.01T^2 \quad (1-1)$$

或

$$O_s = \frac{468}{31.6 + T} \quad (1-2)$$

式中, T 为水温,以 °C 计;饱和溶解氧 O_s 以 mg/L 计。

当水中溶解氧的实际值低于饱和值时,大气中的氧就会溶解于水。在正常情况下,清洁的地表水中溶解氧接近饱和状态。水中溶解氧是维持水生态和有机物进行分解的条件,许多鱼类在溶解氧为 3~4mg/L 时,就难以生存。

3. 生化需氧量

废水中的有机物在好气菌的作用下分解变为简单的无机物如二氧化碳、水及硝酸盐之类,在分解过程中需要消耗氧气。由生化分解而需要消耗的氧气量称为生化需氧量,以 BOD (biochemical oxygen demand)表示。 BOD 值越高,说明有机物含量越多,因此 BOD 值可用以反映水受有机物污染的程度。

各种有机物经过完全的生物氧化分解所经历的时间很长(约 100 天),因此进