



# 环境流体力学

Environmental Fluid Mechanics

董志勇 著



科学出版社

# 环境流体力学

董志勇 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统地阐述了环境流体力学的基本概念、基本理论及最新研究成果,主要内容包括:环境污染问题、环境污染的基本概念、扩散理论、剪切流离散、射流、羽流、浮射流、大气污染扩散分析、水质模型、地下水污染模型等。为便于读者自学,本书内容力求写得通俗易懂,对一些数学处理给出了比较详细的推导过程,并列举了一些例题。书末附有环境流体力学常用术语中英文对照表和详细的参考文献,以便读者深入研究时参考。

本书可作为水利类、环境类、土木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

环境流体力学/董志勇著. —北京:科学出版社,2015. 10

ISBN 978-7-03-044797-5

I. ①环… II. ①董… III. ①环境物理学-流体力学 IV. ①X12②X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 124322 号

责任编辑:周 炜 李嘉佳 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 10 月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:301 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

环境流体力学是于 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,主要研究污染物在大气、地表水及地下水中的迁移、扩散及转化规律。它是流体力学与环境科学、环境工程、水利工程、市政工程等学科相互交叉、相互渗透的产物,是进行环境空气质量评价、水质评价、大气污染控制及水污染控制的基础。

作者在从事环境流体力学的科研、教学工作中,一直苦于找不到一部较为系统、全面介绍污染物在大气、地表水及地下水中迁移、扩散及转化的著作。作为一种尝试,作者十年前写了一部《环境水力学》,介绍了污染物在地表水、地下水中迁移、扩散及转化的规律,曾作为高年级本科生和研究生的教材。近年来,随着我国经济社会的快速发展,多地接连出现以颗粒物( $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$ )为特征污染物的灰霾天气,大气环境污染问题日趋严重,大气污染防治工作面临巨大挑战。本书较为系统地阐述了环境流体力学的基本概念、基本理论及基本的研究方法,不仅包括地表水、地下水污染问题,同时涵盖大气污染问题,以使环境流体力学的内容更加完善。在叙述上,力求深入浅出、重点突出。主要思路为:从大气污染到地表水污染再到地下水污染;从点源污染到线源、面源污染;从瞬时源到连续源;从无限空间的扩散到有限空间的扩散;从基本的动量射流到羽流、浮射流;从最基本的 Fick 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;在问题的数学描述上,给出物理概念清晰的理论解。如果本书的内容能对读者的学习、教学、研究、设计等有所帮助的话,作者将感到无比欣慰。

本书的出版得到“浙江工业大学专著出版基金”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。本书插图的绘制由作者的研究生林斌、张茜、刘昶、陈乐完成,在此深表感谢。最后,感谢在本书撰写和出版过程中所有给予关心、支持和帮助的人们。

在本书撰写过程中,作者虽力求审慎,但由于水平有限,书中尚存在一些不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2014 年 10 月于杭州

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 环境污染问题 .....	1
1.1.1 大气环境污染问题 .....	1
1.1.2 海洋环境污染问题 .....	2
1.1.3 河流污染问题 .....	4
1.1.4 河口污染问题 .....	4
1.1.5 湖泊污染问题 .....	5
1.1.6 水库污染问题 .....	6
1.1.7 地下水污染问题 .....	7
1.1.8 热污染问题 .....	8
1.1.9 城市水环境问题 .....	8
1.2 环境污染的基本概念 .....	9
1.2.1 污染源的分类 .....	9
1.2.2 水与空气环境质量的度量指标 .....	9
1.3 环境质量标准 .....	14
1.3.1 地表水环境质量标准 .....	15
1.3.2 环境空气质量标准 .....	16
1.3.3 地下水质量标准 .....	16
<b>第 2 章 扩散理论</b> .....	17
2.1 Fick 定律与扩散方程 .....	17
2.1.1 Fick 定律 .....	17
2.1.2 扩散方程 .....	18
2.2 瞬时源扩散 .....	20
2.2.1 瞬时源一维扩散 .....	20
2.2.2 瞬时源二维、三维扩散 .....	22
2.2.3 瞬时源迁移扩散 .....	23
2.3 连续源扩散 .....	24
2.3.1 等强度连续点源的一维扩散 .....	24
2.3.2 等强度连续点源的三维扩散 .....	25

2.3.3	等强度连续点源的迁移扩散	26
2.3.4	变强度连续点源的一维扩散	27
2.3.5	分布连续源的一维扩散	27
2.4	有限空间中扩散	28
2.4.1	一侧有边界的一维扩散	29
2.4.2	两侧有边界的一维扩散	29
2.5	分子扩散的随机游动理论	30
2.6	紊动扩散的拉格朗日法	32
2.7	紊动扩散的欧拉法	36
2.7.1	紊动扩散方程	36
2.7.2	紊动 Schmidt 数	37
2.8	岸边排放与中心排放污染带的计算	38
2.8.1	污染带浓度分布	39
2.8.2	污染带宽度	40
2.8.3	均匀混合的纵向距离	40
<b>第 3 章</b>	<b>剪切流离散</b>	<b>43</b>
3.1	圆管剪切流离散	43
3.1.1	剪切流离散基础	43
3.1.2	圆管层流离散分析	47
3.1.3	圆管紊流离散分析	48
3.2	明渠剪切流离散	49
3.3	非恒定剪切流离散	52
<b>第 4 章</b>	<b>射流、羽流和浮射流</b>	<b>57</b>
4.1	紊动射流基本方程	58
4.1.1	紊流基本方程	58
4.1.2	紊流边界层方程	60
4.2	紊流的半经验理论	60
4.2.1	Prandtl 混合长度理论	61
4.2.2	Prandtl 自由紊流理论	62
4.3	自由紊动射流的一般特性	63
4.3.1	断面流速分布的相似性	64
4.3.2	射流边界的线性扩展	64
4.3.3	动量通量守恒	65
4.4	紊动平面射流	66
4.4.1	紊动平面射流的理论解	67

4.4.2	紊动平面射流的主体段	68
4.4.3	紊动平面射流的初始段长度	71
4.4.4	紊动平面射流的浓度分布	71
4.5	紊动圆形射流	72
4.5.1	紊动圆形射流的理论解	72
4.5.2	紊动圆形射流的主体段	74
4.5.3	紊动圆形射流的初始段长度	75
4.5.4	紊动圆形射流的浓度分布	76
4.6	羽流	77
4.6.1	积分方法	78
4.6.2	量纲分析法	84
4.7	圆形浮射流	86
4.7.1	静止均质环境中圆形浮射流	86
4.7.2	线性分层环境中圆形浮射流	97
4.8	平面浮射流	102
4.8.1	静止均质环境中平面浮射流	102
4.8.2	线性分层环境中平面浮射流	110
4.9	浮射流的量纲分析法	114
<b>第5章</b>	<b>大气污染扩散分析</b>	<b>120</b>
5.1	大气分层	120
5.1.1	对流层	120
5.1.2	同温层	121
5.1.3	中间层	122
5.1.4	电离层	122
5.1.5	外逸层	122
5.2	影响大气污染的气象条件和下垫面状况	123
5.2.1	风	123
5.2.2	大气稳定度	125
5.2.3	逆温层	129
5.2.4	下垫面局地风对污染扩散的影响	131
5.3	烟囱排放的烟流形态	134
5.4	烟流扩散分析	139
5.4.1	烟流抬升高度的计算	139
5.4.2	扩散参数的确定	142
5.4.3	烟流落地浓度的计算	146

5.4.4	烟囱高度及出口直径的确定 .....	160
5.5	机动车尾气扩散分析 .....	163
5.5.1	无限长线源的扩散模式 .....	163
5.5.2	有限长线源的扩散模式 .....	164
5.5.3	线源强度 .....	165
<b>第6章</b>	<b>水质模型</b> .....	<b>167</b>
6.1	河流 BOD-DO 耦合模型 .....	167
6.1.1	Streeter-Phelps 模型 .....	167
6.1.2	Thomas 修正模型 .....	169
6.1.3	O'Connor 修正模型 .....	169
6.1.4	Camp-Dobbins 修正模型 .....	170
6.1.5	复氧系数与耗氧系数 .....	170
6.2	河流综合水质模型 .....	173
6.3	湖泊水质模型 .....	180
6.3.1	Vollenweider 模型 .....	180
6.3.2	湖泊综合水质模型 .....	182
6.4	重金属污染模型 .....	187
6.4.1	重金属污染问题 .....	187
6.4.2	重金属迁移模型 .....	189
<b>第7章</b>	<b>地下水污染模型</b> .....	<b>192</b>
7.1	概述 .....	192
7.1.1	污染源 .....	192
7.1.2	多孔介质 .....	192
7.1.3	弥散方程 .....	193
7.2	地下水污染的随机模型 .....	193
7.3	地下水污染的黑箱模型 .....	195
7.4	地下水污染问题的解析解 .....	196
7.4.1	半无限长土柱中连续注入示踪剂的运移模型 .....	196
7.4.2	半无限长土柱中短时间注入示踪剂的运移模型 .....	199
7.4.3	地下放射性物质的弥散问题 .....	200
7.4.4	地下水污染径向弥散问题 .....	201
7.4.5	地下水污染平面二维弥散问题(瞬时注入情形) .....	202
7.4.6	地下水污染平面二维弥散问题(连续注入情形) .....	203
<b>参考文献</b>	.....	<b>205</b>
<b>附录</b>	<b>常用术语中英文对照表</b> .....	<b>211</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 环境污染问题

### 1.1.1 大气环境污染问题

大气污染是指由于人类活动而排放到空气中的有害气体和颗粒物(particulate matter),累积到超过大气自净作用(稀释、转化、洗净、沉降等)所能降低的程度,在一定持续时间内有害于生物及非生物。按照国际标准化组织(International Organization for Standardization)的定义,大气污染是指由于人类活动和自然过程引起某种物质进入大气中,呈现出足够的浓度,达到足够的时间,并因此而危害了人体的舒适、健康和福利或危害了环境的现象。

近年来,随着我国经济社会的快速发展,多个地区接连出现以颗粒物( $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ )为特征污染物的灰霾天气,大气颗粒物已成为影响我国环境空气(ambient air)质量的首要污染物。美国国家航空航天局(NASA)2010年公布的全球 $PM_{2.5}$ 卫星监测图显示,我国除新疆、西藏外,大部分地区被灰霾所笼罩,尤其在华北、华东及华中地区, $PM_{2.5}$ 浓度远远超过我国环境空气质量标准所规定的浓度限值。我国以煤炭为主的能源消耗量大幅攀升,机动车保有量急剧增加,城市建设施工作业量巨大,大气氧化性不断增强,使得我国大气环境污染问题日趋严重,大气污染防治工作面临巨大挑战。

大气污染的来源主要来自两个方面:一方面是由自然界的自然现象引起的,此类污染一般依靠大气的自净作用,最终可达到平衡;另一方面是由于人类的生产、生活活动引起的,此类污染的特点为集中、持续、排放量大,常常超过大气环境的自净作用。大气污染物按其存在状态一般可分为气态污染物和颗粒物,其中颗粒物与气体行为类似,因此又称为气溶胶。已发现大气中对人体有危害的污染物有100多种,主要为燃烧化石燃料产生的硫氧化物( $SO_x$ )、氮氧化物( $NO_x$ )、碳氧化物( $CO_x$ )、碳氢化合物(HC)及气态有机化合物等。对于气态污染物,又可分为一次污染物和二次污染物。若大气污染物是从污染源直接排放的原始物质,则称为一次污染物;若由一次污染物与大气中原有成分或几种一次污染物之间经过一系列化学或光化学反应而生成的与一次污染物性质不同的新污染物,称为二次污染物。在大气污染中,普遍关注的二次污染物主要为硫酸烟雾和光化学烟雾等。

硫酸烟雾是由大气中的二氧化硫( $\text{SO}_2$ )等硫化物在有水雾、含有重金属的飘尘或氮氧化物存在时,发生一系列化学或光化学反应而生成的硫酸雾或硫酸盐气溶胶;光化学烟雾是由大气中氮氧化物、碳氢化合物与氧化剂之间在阳光照射下发生一系列光化学反应所生成的蓝色烟雾,其主要成分为臭氧、过氧乙酰基硝酸酯(PNA)、酮类及醛类。

我国现阶段大气污染的主要特征如下。

(1) 以煤炭为主的能源消费结构及工业结构和布局的不尽合理,普遍形成城市大气总悬浮颗粒物(TSP)超标、二氧化硫污染保持在较高水平的煤烟型污染。

(2) 城市机动车尾气排放污染物剧增,氮氧化物、一氧化碳(CO)、碳氢化合物污染呈加重趋势,许多大城市的大气污染已由煤烟型污染向煤烟、交通、氧化型等共存的复合型污染转变。

(3) 随着城镇化进程的加快,大规模建筑施工等人为活动引起的扬尘污染加重。

(4) 由于硫氧化物、氮氧化物等致酸物质的排放仍未得到有效控制,全国已形成华中、西南、华东、华南等多个酸雨区,尤以华中酸雨区最为严重。

### 1.1.2 海洋环境污染问题

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,以及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(Danube)、德涅斯特河(Днепр)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 t 磷、340 万 t 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多种有毒物质,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《1994—1996 中国

海洋年鉴》统计,经黄河流入渤海的镉、汞、铅、锌、砷、铬等重金属达 750t,另外还有 2 万 t 石油。排入黄海的污染物负荷则比渤海高 1 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(Scandinavia)半岛上,纵横交错的河流小溪经瑞典、挪威汇入波罗的海(Baltic)。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。造纸厂在对纸张作漂白处理的过程中,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有 30 万~40 万 t,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,波罗的海的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 500km 的里海(Caspian)则完全被陆地所包围。几百年来,势力强大者之间为了控制里海沿岸具有战略意义的河流、港口而发生激战。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、水资源而具有重要的战略意义。这个地区生产的粮食占苏联粮食总产量的 1/5,工业产值占 1/3。伏尔加河(Волга)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 t,仅石油化工厂每年就向里海排放近 7 万 t 工业废水。因此,里海的渔业资源濒临崩溃,鲈鱼、狗鱼的捕获量自 20 世纪 90 年代以来下降了 96%,但是下降幅度最大的当属鲟鱼,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、砒、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迁移,致使海滩环境恶化,休养地、风景区及鸟类栖息环境也遭破坏。

### 1.1.3 河流污染问题

河流是陆地上最重要的水体,城市和大工业区大多沿河建立,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。

### 1.1.4 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(mixing index, MI)的大小。若  $MI \geq 1.0$ ,则咸淡水分层明显,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,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,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。

### 1.1.5 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) 湖泊污染来源广、途径多、种类多

上游和湖区的入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(双对氯苯基三氯乙烷)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。

## 1.1.6 水库污染问题

自 20 世纪 90 年代以来,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,阻碍汛期行洪,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“长江大洪水”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,损失电量达 5651 万 kW·h。

### 1.1.7 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滤渗入地下;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。

#### 2. 地下水污染的特点

##### 1) 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,但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。

##### 2) 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。例如,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。

##### 3) 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,如山前冲积、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。

### 1.1.8 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,厌氧发酵、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,期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。

### 1.1.9 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。进入21世纪以来,我国城市化的进程大大加快,2010年全国的城市化水平达49.7%。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。

## 1.2 环境污染的基本概念

### 1.2.1 污染源的分类

污染源是指向大气或水体中排放各种污染物的生活或生产过程、设备及场所等。常用的分类方法有以下几种。

(1) 若按污染源的形态来划分,可分为固定源(stationary source)和移动源(mobile source)。污水排放口、烟囱等即为固定源;车、船、飞机等交通运输工具即为移动源。

(2) 若按污染源的几何形状来划分,可分为点源(point source)、线源(line source)及面源(plane source),其中线源、面源又称为非点源(non-point source)。点源如污水排放口、烟囱等,线源如城市道路或公路上机动车尾气的排放等,面源如居民区烟道、农田施用化肥农药等。

(3) 若按污染源距地面的高度来划分,可分为高架源(elevated source)和地面源(ground level source)。高架源如烟囱、公寓楼顶烟道等,地面源如秸秆焚烧、机动车尾气、燃放烟花爆竹等。

(4) 若按污染源排放时间来划分,可分为连续源(continuous source)和瞬时源(instantaneous source)。连续源如污水排放口、烟囱等,瞬时源如运输危险品的船舶失事、油轮失事、火灾等。

实际中,上述污染源常为几种污染源混合在一起,如连续点源、瞬时点源等。

### 1.2.2 水与空气环境质量的度量指标

#### 1. 污染物浓度

评价水环境质量时,水中污染物的浓度常用 mg/L 或 ppm 来表示。其中 ppm 是英文 part per million 的缩写,意为百万分之一,因  $1\text{kg} = 10^6\text{mg}$ ,故  $1\text{mg/L} = 1\text{ppm}$ 。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。

评价环境空气质量时,常用  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\text{mg}/\text{m}^3$  来度量空气中污染物的浓度。

#### 2. 颗粒物 PM

$\text{PM}_{2.5}$  指环境空气(ambient air)中空气动力学当量直径小于等于  $2.5\mu\text{m}$  的颗粒物,也称细颗粒物,直径不到人类头发丝粗细( $50\sim 70\mu\text{m}$ )的  $1/20$ ;  $\text{PM}_{10}$  指环境