



北京  
师范大学出版社  
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PRESS

● 新世纪高等学校研究生教材

环境科学与工程系列教材

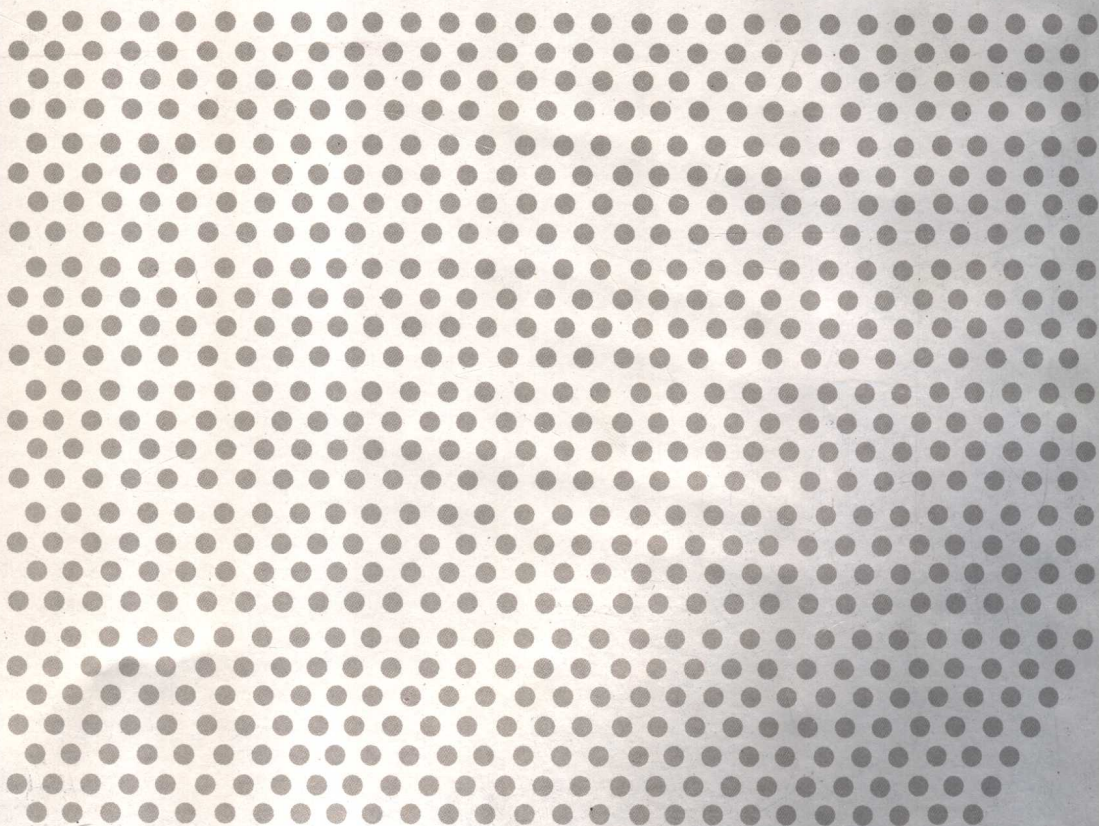
HUANJIING SHUILIXUE

YUANLI

# 环境水力学原理

杨志峰 主编

王烜 孙涛 郝芳华 陈家军 编著





北京师范大学出版社  
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PRESS

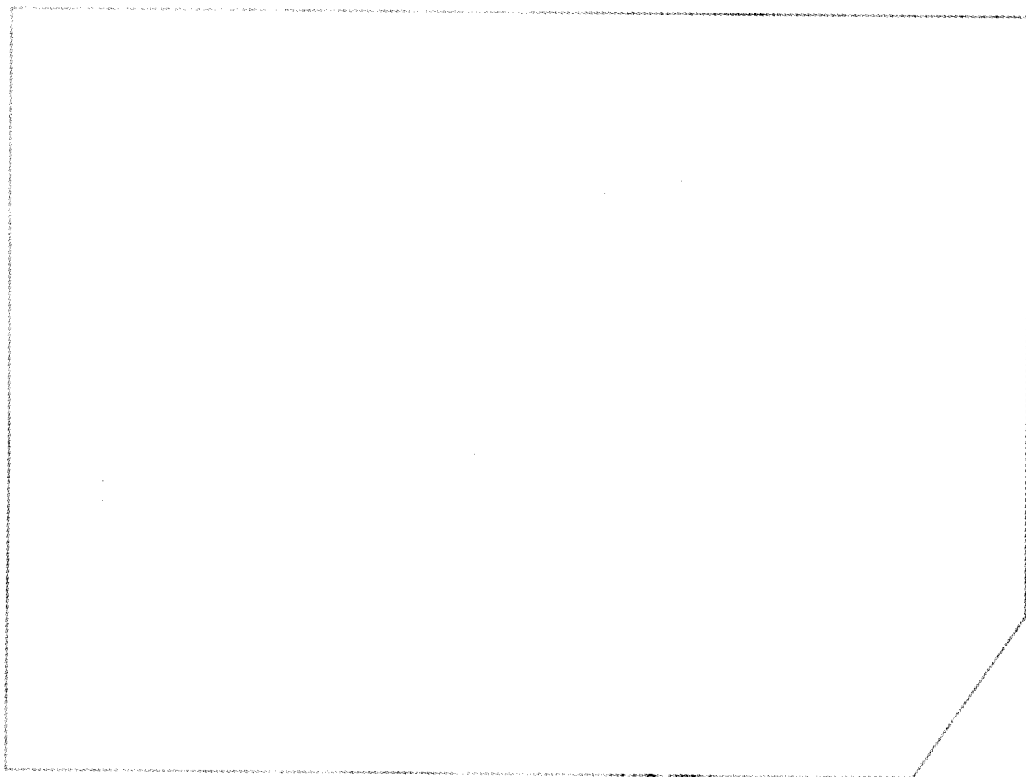
● 新世纪高等学校研究生教材

环境科学与工程系列教材

HUANJING SHUILIXUE  
YUANLI

# 环境水力学原理

杨志峰 主编  
王烜 孙涛 郝芳华 陈家军 编著



## 内 容 提 要

环境水力学主要研究污染物质在水体中的扩散、输移、混合规律. 本书系统地介绍了环境水力学的基本概念、基本理论和分析问题的基本方法. 全书共分十章: 绪论, 水流运动的基本规律, 分子扩散, 紊动扩散, 流动离散, 射流、羽流及浮射流, 河流的水质模拟, 湖泊、水库的水质模拟, 地下水的水质模拟及生态水力学基础. 为便于读者掌握和应用, 书中附有许多例题, 章末附有复习思考题, 在河流、湖泊水库、地下水的水质模拟和生态水力学基础这几章中还介绍了若干应用实例.

本书内容丰富充实、结构紧凑, 逻辑性和系统性强, 既有一定的理论深度, 又注重能力的培养, 便于教和学. 可作为高等学校水利、环境、化工、能源等专业大学生、研究生的环境水力学教材和主要参考书, 也可供相关专业科技与工程技术人员使用.

### 图书在版编目(CIP)数据

环境水力学原理/杨志峰主编; 王烜等编. —北京: 北京师范大学出版社, 2005. 9

ISBN 7-303-07801-0

I. 环… II. ①杨…②王… III. 环境水力学 IV. X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 111504 号

北京师范大学出版社出版发行

(北京新街口外大街 19 号 邮政编码: 100875)

<http://www.bnup.com.cn>

出版人: 赖德胜

北京京师印务有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 170mm×230mm 印张: 13.5 字数: 240 千字

2006 年 4 月第 1 版 2006 年 4 月第 1 次印刷

印数: 1~3 000 定价: 20.00 元

## 前 言

水是生命之源,是人类生存与发展的命脉。随着社会经济的迅猛发展和人口的快速增加,许多国家相继出现了水资源危机,我国也正面临着水资源短缺和污染加剧的严峻态势。水安全问题已受到了世界范围内的高度重视。

水作为可持续发展的基础与条件,是质和量的有机统一体。离开了质,量也就失去了意义。污染物质进入水体后会溶解扩散,或随水流的输移而扩展其影响范围。为了充分利用水环境容量资源以减少污水处理费用,必须了解不同的排放条件和纳污环境中,污染物的稀释、混合和转化规律,预测污染物浓度随时空的变化情况。这就需要将研究清洁水流运动的传统水力学与环境科学的基础理论交叉融合,于是环境水力学应运而生。虽然环境水力学发展成为水力学的的一个分支学科只有 30 余年的历史,但作为水质规划、环境管理和水资源保护决策的重要基础,自它形成之初就已展现出其旺盛的生命力和强劲的发展势头,并在解决实际水环境问题的过程中发挥着日益重要的作用。

作者根据多年来从事水环境模拟工作的教学、科研经验,综合集成了国内外相关领域的先进成果,系统地介绍了环境水力学的基本概念、基本理论和分析问题的基本方法。本书共分十章,第 1 章(绪论)对环境水力学的研究内容、任务、意义以及学科发展的历史和趋势作了简要概括;第 2 章介绍了水流运动的基本概念、分析方法和控制方程;后续章节分别详细地介绍了分子扩散、紊动扩散、流动离散、射流羽流及浮射流的研究方法和成果;给出了河流、湖泊、水库中常用的水质模型;为使知识体系更加完整,书中还阐述了地下水的水质模拟;根据目前环境水力学学科发展逐渐与生态学相结合的特点和趋势,最后一章介绍了目前环境科学研究的热点问题——生态水力学的基本原理和若干应用实例,试图对该领域的发展起到抛砖引玉的作用。为了抓住主要线索和便于初学者入门,本书把重点放在对分析、解决问题的思路与方法的引导。

本书由杨志峰教授策划指导、组织编写和最终审核,参加各章编写的作者分别为:第 1,2 章,王烜;第 3 章,郝芳华、王烜、陈浩;第 4 章,郝芳华、王烜、付永硕;第 5 章,孙涛、赵瑞;第 6 章,王烜、张丽娜;第 7 章,孙涛、赵瑞、许其功;第 8 章,郝芳华、王烜、王静;第 9 章,陈家军、支银芳;第 10 章,王烜、孙涛、李剑颖。王烜负责全书的统稿。本书在从组织到出版的过程中,得到了北京师范大学环境学院刘静玲教授的大力支持和协助,在此表示衷心的感谢。

环境水力学的研究内容极其丰富,本书只是反映了其中一些基础性的研究成果,不可能面面俱到.作为一门新兴学科,环境水力学的学科体系和研究范畴正在不断地发展变化.生产生活中水资源保护的迫切需要和现代科学技术的突飞猛进,都将为该学科注入新的活力和内涵.由于时间紧迫,加之作者才疏学浅,书中难免存在错误和疏漏,敬请读者批评指正.

编 者

2005 年 4 月于北京师范大学

# 目 录

## 第 1 章 绪论/01

### 1.1 水资源与水环境/01

#### 1.1.1 概况 /01

#### 1.1.2 水体污染的机理、特点和危害/02

#### 1.1.3 物质在水体内迁移的主要方式/04

### 1.2 环境水力学研究的对象、任务与方法/05

#### 1.2.1 研究对象/05

#### 1.2.2 研究任务/06

#### 1.2.3 研究方法/06

### 1.3 环境水力学学科发展状况/08

#### 1.3.1 学科沿革/08

#### 1.3.2 深入研究的领域及成果/08

#### 1.3.3 发展趋势/10

#### 复习思考题/11

## 第 2 章 水流运动的基本规律/12

### 2.1 水流运动的分类/12

### 2.2 水流运动的分析方法 /13

### 2.3 水流运动的基本控制方程/13

#### 2.3.1 连续性方程/14

#### 2.3.2 动量方程/14

#### 2.3.3 能量方程/15

### 2.4 紊流的模拟方法 /16

#### 复习思考题/17

## 第 3 章 分子扩散 /18

### 3.1 概述/18

### 3.2 分子扩散的费克定律 /19

### 3.3 静水扩散方程的求解 /21

#### 3.3.1 瞬时点源/22

#### 3.3.2 瞬时分布源 /26

- 3.3.3 时间连续源 /28
- 3.3.4 有边界反射情况下的瞬时点源/29
- 3.4 层流移流扩散方程的求解/31
- 3.4.1 移流扩散方程 /31
- 3.4.2 移流扩散方程的解 /32

复习思考题 /33

#### 第4章 紊动扩散/35

- 4.1 紊流的特征及分析方法 /35
- 4.1.1 紊流的特性 /35
- 4.1.2 紊流的分析方法/36
- 4.2 紊流脉动量相关 /36
- 4.3 紊动扩散的拉格朗日法 /38
- 4.4 紊动扩散的欧拉法/40
- 4.4.1 紊动扩散方程 /40
- 4.4.2 雷诺比拟/42
- 4.4.3 若干定解条件下紊动扩散方程的解 /42

复习思考题 /46

#### 第5章 流动离散 /47

- 5.1 一维纵向离散方程/47
- 5.2 圆管流动中的离散/49
- 5.2.1 层流中的离散/49
- 5.2.2 圆管紊流中的离散 /52
- 5.3 二维明渠流动中的离散/53
- 5.4 天然河流中的离散/55
- 5.4.1 污水入河后的三个混合阶段 /55
- 5.4.2 河流的紊动扩散系数 /56
- 5.4.3 污染带的计算/57
- 5.4.4 河流的纵向离散系数 /61
- 5.5 非恒定剪切流的离散 /65

复习思考题 /66

#### 第6章 射流、羽流及浮射流 /67

- 6.1 概述/67
- 6.1.1 射流的定义和分类 /67
- 6.1.2 紊动射流的形成和结构/68

- 6.1.3 紊动射流的特性/68
- 6.1.4 射流问题的研究目的和分析途径 /71
- 6.2 等密度紊动射流 /71
- 6.2.1 平面淹没射流 /71
- 6.2.2 圆形断面淹没射流/76
- 6.3 羽流/78
- 6.3.1 密度佛汝德数和鲍辛尼斯克近似 /78
- 6.3.2 点源羽流/81
- 6.3.3 线源羽流/84
- 6.4 均质环境流体中的浮射流/86
- 复习思考题 /90

## 第7章 河流的水质模拟/91

- 7.1 河流水质模型概述/91
- 7.1.1 水质模型分类/91
- 7.1.2 水质模型发展过程 /92
- 7.2 河流水质模型的基本方程及其求解/92
- 7.2.1 零维方程(箱式模型)及基本解 /93
- 7.2.2 一维河流水质模型的基本方程/94
- 7.2.3 二维河流水质模型的基本方程/95
- 7.2.4 三维河流水质模型的基本方程/98
- 7.3 水体耗氧、复氧机理与溶解氧水质模型/99
- 7.3.1 水体耗氧、复氧机理/99
- 7.3.2 溶解氧模拟的 BOD-DO 模型 /101
- 7.3.3 溶解氧水质方程参数估算 /103
- 7.4 其他常用水质模型/106
- 7.5 河口及感潮河流水质模型/107
- 7.5.1 河口及其水文概况 /107
- 7.5.2 河口水质问题 /107
- 7.5.3 河口与感潮河段水质模型基本方程及其求解/108
- 7.6 综合的成熟商业化河流水质模型/111
- 7.7 河流水质模型实例/115
- 7.7.1 三峡水库调度及水质预测方案/115
- 7.7.2 预测结果与分析/116
- 复习思考题 /118

## 第8章 湖泊、水库的水质模拟/119

8.1 湖泊、水库的特征及其对水质的影响 /119

8.2 影响湖泊、水库水质传递的主要因素 /120

8.3 湖泊、水库温度模型 /121

8.3.1 均匀混合湖泊的温度模型 /122

8.3.2 垂向一维温度模型 /122

8.4 湖泊、水库水质模型 /124

8.4.1 均匀混合湖泊的水质模型 /124

8.4.2 分层湖泊水质模型 /126

8.5 湖泊、水库富营养化模型/127

8.5.1 总磷质量平衡模型 /128

8.5.2 其他模型/129

8.6 湖泊、水库水质模型应用实例 /133

复习思考题 /135

## 第9章 地下水的水质模拟/136

9.1 基本概念 /136

9.1.1 流体的连续介质假定 /136

9.1.2 多孔介质及其连续介质假定 /136

9.1.3 孔隙度与有效孔隙度 /137

9.1.4 渗流速度与实际平均流速 /138

9.2 弥散理论基础 /139

9.2.1 水动力弥散现象/139

9.2.2 水动力弥散机理/139

9.2.3 水动力弥散系数/141

9.3 污染物在地下水转化的主要方式 /143

9.3.1 吸附与离子交换/143

9.3.2 溶解沉淀/145

9.3.3 衰变 /146

9.4 地下水运动及污染质运移的基本方程/147

9.4.1 地下水状态方程/147

9.4.2 地下水流运动方程(Darcy 定律) /148

9.4.3 地下水流连续性方程/150

9.4.4 地下水中污染质运移的对流—弥散方程/152

9.5 地下水水质模型的求解/155

|             |                         |
|-------------|-------------------------|
| 9.5.1       | 地下水水质模型的建立/155          |
| 9.5.2       | 常用地下水模型的解析解 /157        |
| 9.5.3       | 数值解法/164                |
| 9.6         | 地下水水质模型应用实例/166         |
| 9.6.1       | 饱和带含水层放射性核素运移预测 /167    |
| 9.6.2       | 饱和带含水层石油类污染物运移预测/170    |
| 9.6.3       | 包气带土壤石油类污染物运移预测 /172    |
|             | 复习思考题 /175              |
| <b>第10章</b> | <b>生态水力学基础/178</b>      |
| 10.1        | 概述/178                  |
| 10.1.1      | 生态水力学的定义、研究内容及意义/178    |
| 10.1.2      | 生态水力学研究现状与发展趋势 /180     |
| 10.2        | 水力因素对生态环境的影响 /181       |
| 10.3        | 污染物对水生态系统的影响机制/186      |
| 10.3.1      | 吸附作用/186                |
| 10.3.2      | 挥发作用/187                |
| 10.3.3      | 氧化还原作用/188              |
| 10.3.4      | 光解作用/188                |
| 10.3.5      | 水解作用/188                |
| 10.3.6      | 配合作用/189                |
| 10.3.7      | 生物降解/189                |
| 10.3.8      | 生物富集和生物积累/190           |
| 10.4        | 生态水力学的的基本模型方程 /191      |
| 10.4.1      | 水力学模型 /191              |
| 10.4.2      | 水质—生态模型/191             |
| 10.4.3      | 生态水力学耦合模型/193           |
| 10.5        | 生态水力学原理在生态环境保护中的应用 /193 |
| 10.5.1      | 生态环境需水研究 /193           |
| 10.5.2      | 无螺灌溉取水技术 /198           |
| 10.5.3      | 北京城市水系改造—转河的污染治理/199    |
|             | 复习思考题 /199              |
| <b>附录</b>   | <b>高斯函数及误差函数值表/200</b>  |
|             | <b>主要参考文献/201</b>       |

## 第1章 绪论

### 1.1 水资源与水环境

#### 1.1.1 概况

水是人类生存的重要条件,生命发源于水中,而且有赖于水分才能维持.人类的生活、工农业生产无不消耗水.据统计,地球上约有 13.8 亿立方千米的水,但其中有绝大部分是不适合人类使用的咸水或高矿化度水,淡水只有 2.5%.而淡水 70% 以上被储藏在南极和北极的冰盖、大陆冰川和深层地下水中,可直接利用的淡水是江河湖泊和地下水的一部分,不到地球总水量的 1%.因此,淡水是十分珍贵而有限的资源.

随着世界经济的发展、人口的激增及城市化进程的加快,地球上的水资源储量正在下降,江河裸露出河床,地下水源面临枯竭,湖泊水域在缩减,而人类对水资源的需求却以惊人的速度扩大.与此同时,日益严重的水污染正蚕食着大量可供消费的水资源.目前,全世界每天约有 200 t 垃圾倒进河流、湖泊和小溪.占世界人口 40% 的 80 个国家严重干旱,半数以上国家和地区得不到干净的水.世界上有 12 亿人生活在缺水的地区,30 亿人缺乏用水卫生设施,每年有 300 万到 400 万人死于与缺水和水污染有关的疾病.许多国家正面临着水资源危机,由此带来的生态系统恶化和生物多样性破坏,也严重威胁着人类的生存.

中国是一个严重缺水的国家.淡水资源总量为 2.8 亿万立方米,占全球水资源的 6%,居世界第六位.但人均只有  $2\,300\text{ m}^3$ ,仅为世界平均水平的 1/4,是全球 13 个人均水资源最贫乏的国家之一.目前,全国有 11 个省、市的 100 多座县级以上城市供水短缺,其中严重缺水城市占 56%,全国城市缺水总量为 60 亿立方米.

在水资源短缺的形势下,大量未经处理或部分处理的污水、农用化学品和工业废水进入了水环境,使我国各水域遭到不同程度的污染,且有逐年加重的趋势.2003 年长江、黄河、淮河等七大水系 407 个重点监测断面中,Ⅰ~Ⅲ类水质占 38.1%;Ⅳ~Ⅴ类水质占 32.2%;劣Ⅴ类水质占 29.7%.其中七大水系干流的 118 个国控断面中,Ⅰ~Ⅲ类水质断面占 53.4%,Ⅳ、Ⅴ类水质断面占 37.3%,劣Ⅴ类水质断面占 9.3%.各水系干流水质好于支流水质.2003 年监测的 28 个重点湖库中,满足Ⅱ类水质的湖库占 3.6%;Ⅲ类水质湖库占 21.4%;

Ⅳ类水质湖库占 25.0%；Ⅴ类水质湖库占 14.3%；劣Ⅴ类水质湖库占 35.7%。水污染已出现由支流向主干延伸、由城市向农村蔓延、由地表水向地下水渗透、由陆地向海域发展的趋势。水污染降低了水体的使用功能，不仅进一步加剧了水资源短缺的矛盾，而且危害生产、破坏生态，并直接威胁着人类的饮水安全和健康。因此，水资源短缺和水污染已成为制约我国社会经济可持续发展的瓶颈，水安全问题已成为当前人类面临的最为急迫的重要课题。

### 1.1.2 水体污染的机理、特点和危害

所谓“水体”，一般是海洋、湖泊、河流、沼泽、水库、地下水的总称。当污染物进入水体后，水体可以通过稀释混合、吸附、凝聚、生成不溶性物质沉入水底和微生物氧化分解有机物等过程，使水质得到一定程度的净化和改善，即水体具有自净能力。当水体的自净能力不足以消除污染物的影响，就会出现水体污染。水体污染可定义为：进入水体的污染物的数量或浓度超过了水体的自净能力，使水和水体底泥的物理、化学性质或生物群落组成发生改变，正常的生态系统和生态功能遭到破坏，从而降低了水体原有的使用价值，影响到人类的经济利益，造成了环境质量、资源质量、人群健康等方面的损失和威胁。

#### 1. 水体污染的机理

进入水体的污染物按其物理、化学及生物特性，可分为物理污染物（废热、放射性物质等），化学污染物（无机污染物、有机污染物、重金属、石油类等），生物污染物（病菌、病毒、寄生虫卵等）和综合污染物（废渣、致病有机体等）。水体污染是物理、化学和生物等方面综合作用的结果。

##### （1）物理作用

物理作用的特点是水体中的污染物在水力和自身力量的作用下扩大在水中所占的空间，随着分布范围扩大，污染物在水中的浓度降低，但它只影响水体的物理性质（温度、密度等）、状况和分布而不改变水的化学性质，也不参与生物作用。如污染物在水中的稀释、扩散、迁移、沉降、挥发和悬浮等，即属于物理作用。

##### （2）化学与物理化学作用

污染物质在随水流运动的过程中多以离子或分子状存在，并发生一系列的化学反应，如氧化还原、酸碱反应、分解化合、吸附解吸、凝聚等，这些化学与物理化学作用能改变污染物的存在形态、水环境的化学反应条件和污染物质的迁移转化能力。

##### （3）生物与生物化学作用

污染物质在水中会受到生物的生理、生化作用，也会通过食物链的传递发生分解、转化和富集。水体中的某些微生物可以将有害的有机污染物氧化分解

为无害的物质,从而使水质净化;而有些微生物也可以将有害的污染物质转化为更有害的物质,即发生恶性转化.此外,水中的微量污染物可以通过生态系统的食物链将污染物浓度富集千百倍以上,从而使生物和人体受害,例如某些农药的富集等.

## 2. 水体污染的特点

水体污染导致了环境质量和资源质量的下降,其结果表现在如下几方面.

### (1) 溶解氧下降

由于有机质的氧化分解需要消耗水中的溶解氧,若耗氧的速率大于大气复氧的速率,则水中的溶解氧会不断下降,直接影响鱼类和其他水生生物的生存和生长.当水中溶解氧耗尽后,水中厌氧细菌繁殖,对有机物进行不完全分解,使水色变黑,甚至产生恶臭.

### (2) 水生生态系统的改变

大量的氮、磷、钾等植物营养物质进入湖泊、水库及海湾等缓流水体,将促使藻类快速繁殖,限制鱼类的生存空间,并导致水体富营养化.水体一旦发生富营养化,植物营养物质将长期保存在水体中,不断循环,即使切断外界营养物质的来源,水质也很难恢复.长期的富营养化过程会加速水体的衰老化,最终由杂草丛生逐渐演变为沼泽.

此外,热污染和毒污染等也会使水环境的性状发生改变,从而导致水生态系统结构的变化,使有的物种消失,有的物种过量繁殖,生态系统原有的平衡遭到破坏.

### (3) 毒性增强

水中某些微生物对污染物的恶性转化作用和生物富集作用,将使污染物的浓度增大、毒性增强.另外,各种无机物(酸、碱、无机盐类)的进入,使水体 pH 值发生变化,在强酸或强碱性环境中,大多数金属会形成易溶性化合物,从而有利于其迁移,由此对生物的毒性也会进一步增强.

## 3. 水体污染的危害

### (1) 影响水生生物和人体健康

水体污染对人体健康的危害可分为两类:一类是由于水中含有某些病原微生物,引起疾病和传染病的蔓延;另一类是水中含有的有害有毒物质会使水生生物中毒受害,并通过食物链逐渐浓缩,最终危害人体.如果人们食用被污染的水、水产品和农产品,会造成慢性中毒、急性中毒甚至死亡,或通过遗传殃及后代.据世界卫生组织报道,世界上有 75% 左右的疾病与水体污染有关,如常见的伤寒、霍乱、胃炎、痢疾、红眼病和肝炎等.又如,日本曾出现的痛痛病,就是人们长期食用受镉污染的河水和灌溉水含镉的稻米造成的.

## (2)影响渔业和工、农业生产

水体污染会造成鱼虾类等的慢性中毒,降低其商品价值,严重时可导致水产品突发性大量死亡,影响渔业生产;一些工厂因水污染引起产品质量下降甚至停产,造成经济损失;用受污染的水体灌溉农田、菜地,会使农作物因水体污染而减产或无法食用,对农业生产带来很大损失。

## (3)损坏旅游资源

当工、农业废水排入水体后,往往会在颜色、臭味、泡沫、浑浊度等方面影响人的感官感受,使人感到不愉快,从而造成旅游资源价值的下降,游客人数的减少。例如不少名湖因富营养化而导致吸引力下降。

## (4)加剧水资源短缺,并引发其他社会问题

水是与国家的生存和发展息息相关的战略性资源。人类的生产、生活对水资源有数量的要求,同时也有质量的要求。如果没有好的水质,量也就失去了意义。目前,水质性缺水是中国普遍存在的水资源问题,许多地方不是缺水,而是缺好水,正是水体污染加剧了水资源短缺的严峻态势。

水问题不仅是一个生态环境问题,也是一个经济问题、社会问题和政治问题,直接关系到国家的安全。以流域为例,污染的随流传播和上下游之间可利用的清洁水量的不平等都会引起社会动荡,导致区域之间,甚至国家之间的冲突和战争。

### 1.1.3 物质在水体内迁移的主要方式

污染物质进入水体后会溶解扩散,或随水流的输移而扩展其影响范围。物质在水体内迁移主要有分子扩散、随流输移、紊动扩散、剪切流离散和对流扩散等方式,物质通过这些方式和受纳水体混合,从而得到稀释。

#### 1. 分子扩散

在浓度差或其他推动力的作用下,由于分子、原子等的布朗运动所引起的物质在空间的迁移现象,称为分子扩散。分子扩散是质量传递的一种基本方式,如盐在水中溶解。

分子扩散与物质性质、含有物浓度梯度、温度、压力有关。以浓度差为推动力的扩散,即物质组分从高浓度区向低浓度区的迁移,是自然界和工程上最普遍的扩散现象。只要存在浓度差,分子扩散就能够在一切物系中发生。

#### 2. 随流输移

随流输移是指物质以流体为载体,随流体的时均运动而产生的迁移运动。流体的性质、运动特征等将对随流输移作用产生直接的影响。

#### 3. 紊动扩散

紊动扩散又称紊动混合,是指在紊流中由于流体质团的紊动而引起的物质

传递.运动中无论是速度的空间分布还是时间变化过程都没有规律,而且引起大小不等的旋涡,紊动扩散作用的强弱与水流旋涡运动密切相关.

与分子扩散类似,在紊动扩散过程中,也具有含有物质(质量、动量和热量等)的转移,转移的结果是含有物质的分布趋向均匀.对于流动水体,分子扩散与紊动扩散常常相伴而生,同时存在.在研究紊动扩散时,由于分子扩散相对小得多,可以忽略不计;而讨论层流运动中的扩散时,则只考虑分子扩散.

#### 4. 剪切流离散

当过水断面上流速分布不均匀或者说有流速梯度的流动称为剪切流.在剪切流动中,由于流速分布不均匀引起扩散质散开的作用称为离散.离散的产生是由于将流场作空间平均的简化处理而引起的,如果不采用空间平均的简化过程,自然就不需计入离散作用.

#### 5. 对流扩散

对流扩散是与人类活动密切相关的复杂物理过程.在流动的流体中,不仅分子扩散等微观运动会引起物质传递,而且流体微团的宏观运动也将导致动量、热量和质量等的传输.狭义的对流扩散是指由于水体内部存在由温度差和浓度差引起的密度差,在重力场或其他力场作用下而产生的铅垂方向对流运动所伴随的含有物迁移.广义的对流扩散是指溶解态或颗粒态物质随水流的运动而引起的物质传递,在横向、垂向和纵向均可发生对流扩散.与分子扩散不同,对流扩散仅发生在流动流体中.

## 1.2 环境水力学研究的对象、任务与方法

### 1.2.1 研究对象

在各类水环境问题中,水体受到污染致使水质恶化一直是备受关注的课题.实际工程中,污染物质在流体中的浓度分布规律不仅与物质的迁移方式有关,而且还会随纳污水域和污染物性质的不同而变化.但无论是对于哪一类环境问题,由于流体运动所导致的污染物质在水环境系统中的扩散、随流输移规律总需要先了解,以便采取相应的对策措施来保护环境,减少污染的危害.近年来,随着江河、湖库、海洋、河口海湾等各种水域受工业和生活废水的污染日趋严重,准确预测、预报纳污水体受污染的程度和变化趋势显得十分迫切而必要.为了达成环境和经济的双赢,实现水资源的可持续利用,环境水力学应运而生.

环境水力学是近几十年来,特别是20世纪70年代以来,为了适应水资源保护的需要而逐渐形成和发展起来的一门新兴的交叉学科,是环境科学与水力

学相互结合、相互渗透的产物.它以水环境为主要研究对象,研究内容涉及水文学、水力学、水化学、水生物学、生态学、湖沼学、海洋学等多学科交叉.广义地说,环境水力学是研究一切和水体有关的水力学问题,包括水污染、水生态、水土保持、河道变形以及水利工程对环境的影响等;狭义地说,环境水力学主要研究当污染物投放于地表、地下纳污水域中,由于扩散、混合输移所造成的污染物浓度随空间和时间的变化规律以及预测、预报的方法,为水质规划、环境管理和水资源的开发利用提供科学依据.由于环境水力学作为水力学的一门独立的分支学科时间并不长,其体系尚未定型,目前人们仅从狭义角度来研究污染物在各种水体中的扩散输移规律及其应用.

环境水力学属于环境流体力学的范畴,二者的研究方法和手段相似.与以水流自身运动规律为主要研究对象的传统水力学相比,环境水力学则主要研究水体中所含物质的运动规律.它继承了水力学和环境科学的基本理论,是传统水力学的一种发展.

### 1.2.2 研究任务

为了适应水资源的开发利用、城镇建设、工矿交通建设、水利水电工程建设等的需要,有效地维护水环境安全,环境水力学研究的主要任务包括以下几个方面.

1. 了解各种天然和人工水体环境中的水流运动规律,以及在自然变异和人为扰动下水体的污染特征和变化规律.
2. 研究污染物排放与水体水质变化之间的输入响应关系,为环境工程的规划设计、水污染控制管理和突发性水污染事故的预警预报提供环境水力学计算模型.
3. 研究各类水体的水环境容量和自净规律,为污染治理和水资源保护提供决策依据.
4. 对拟建工程进行环境影响预测、评价,供决策者应用和参考.
5. 研究水质因子对生态系统的影响,以及水力因素与生态环境之间的相互作用关系,提出改善生态环境的建议和措施.

### 1.2.3 研究方法

环境水力学作为一门应用科学,在研究方法上既借鉴了自然科学其他学科研究的一般方法,同时由于学科自己的特点,在其发展过程中也逐渐地形成了一些特有的研究方法.概括而言,环境水力学的研究方法主要有理论分析、实验模拟和数值模拟三种方法.

#### 1. 理论分析方法

作为水力学的重要分支学科,环境水力学与传统水力学一样,需要引用经

典力学的基本原理(如牛顿运动定律、质量和能量守恒定律、热力学定律等),并结合流体和污染物运动的特点,通过数理分析,建立描述流体和污染物运动的基本方程或数学模型,给出相应的初始条件和边界条件,并用数学工具分析问题的解。

理论分析方法揭示了流体和污染物运动的物理本质和各物理量之间的内在联系,具有重要的指导意义和普遍的适用性。但是由于水流和污染物运动的多样性,对于比较复杂的物理模型,很难直接得到普遍解,在分析解决问题时往往还需要借助其他研究方法。

## 2. 实验模拟方法

水力学本身是一门实验科学,很多经典的理论和定理来源于实验。实验方法对于环境水力学的发展同样发挥着非常重要的、不可替代的作用。

为了探求污染物在水体中输移、扩散的物理过程并作出定量分析,可在野外或室内采用系统的观测、试验方法进行深入研究。根据实验场地的特点,实验模拟方法可相应地分为现场模拟和实验室模拟。其中,现场模拟即是通过对所研究的对象进行原型观测试验,收集第一性资料,为检验理论分析或总结某些基本规律提供依据。

而实验室模拟是依据相似理论或量纲分析法,通过建立物理模型,对水流运动和污染物变化进行模型实验研究。然后,将其按照相似关系换算为原型的结果,以满足实际工程的需要。模型设计中要解决的关键问题是:

- ①模型和原型中相似关系的处理;
- ②模型中观测的流动现象和数据与原型的转换方法。

实验模拟方法是科学研究的一种基本方法。它既是获得感性认识的基本途径,又是发现、发展和检验理论及科技成果的实践基础。但是实验需要投入较多的时间、人力和实验设备,成本较高,并且物理模型的边界只适应于某一特定问题,针对于不同问题所建立的模型之间缺乏通用性。

## 3. 数值模拟方法

环境水力学的数值模拟方法是指根据流体力学和污染物迁移转化规律,建立数学模型,在一定的边界条件和初始条件下,对水流运动和污染物变化进行数值分析。常用的数值方法有有限差分法、有限单元法、有限分析法、边界元法等。这些方法能够求解环境水力学中一些难于用解析法求解的数学问题,而得到数值解。

与实验模拟方法相比,数值模拟方法大大节约了人力和物力,数学模型的所有条件都以数值给出,不受实验条件限制。模型软件一旦研制成功,就可以通过改变边界条件和其他条件而方便地得到不同的实际问题的解,即数学模型具