



“十二五”江苏省高等学校重点教材



# 环境水力学基础

华祖林 主编



科学出版社

“十二五”江苏省高等学校重点教材(编号:2014-2-053)

# 环境水力学基础

华祖林 主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

环境水力学是一门探讨污染物质进入水体后混合输移规律的交叉学科。本书主要介绍污染物质在水体中输运扩散的方程、简化情况下污染物浓度场计算基本公式、顺直中小型河道污染带特征分析、污染物的分散现象与分散系数确定、不规则水域的污染物混合输运以及水质模型的简要介绍等内容。全书分为七章,旨在使学生掌握环境水力学的基本原理,能够运用水环境预测的基本实用计算方法。

本书可供环境工程、环境科学及水环境保护等相关专业师生使用,也可作为水环境模拟、水环境管理领域科技人员和研究生参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

环境水力学基础 / 华祖林主编. —北京: 科学出版社, 2016. 3

“十二五”江苏省高等学校重点教材

ISBN 978-7-03-046479-8

I. ①环… II. ①华… III. ①环境水力学—高等学校—教材

IV. ①X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 282674 号

责任编辑: 黄 海 / 责任校对: 卢秀娟

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 许 瑞

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>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 10

字数: 210 000

定价: 39.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

在水环境评价、水环境规划、水污染控制方案制定、排污口设置论证、环境容量与纳污能力确定等方面都会直接或间接涉及环境水力学的基础知识。环境水力学是进行水环境模拟的基础，是进行水污染预测评价的必备。

环境水力学是环境科学与工程学科的重要研究分支之一，同时也是水力学及流体力学的重要组成部分，其主要任务是研究污染物质进入水体的掺混、随流、扩散的运输规律，属于交叉科学。

随着经济突飞猛进的发展，目前我国的江、河、湖、海的水环境问题面临着巨大的挑战，环境水力学作为描述污染物质进入水体运输规律的基本课程，对指导水污染控制方案的制定有着十分重要的作用。河海大学及相关院校将环境水力学引入环境专业的本科基础课程教学计划中已有二十多年的历史，随着时代的发展，该课程部分内容已远不能适应当前我国水环境面临的严峻形势与水环境模拟的实际需求。本书即为总结环境水力学教学经验，切合环境类学生的专业基础情况编写而成，着重介绍环境水力学方面的基础性知识，主要是面向环境领域的本科生，用于环境工程、环境科学及相关专业使用。

本书共有 7 章，主要为污染物质扩散运输与混合的基础理论、污染物浓度场计算的基本内容，包括第一章“绪论”、第二章“污染物质输运方程”、第三章“简化情况下污染物浓度计算基本公式”、第四章“顺直中小型河道污染带特征计算”、第五章“污染物分散现象与分散系数确定”、第六章“不规则水域中污染物的混合输运”、第七章“水质模型简介”。本书旨在使读者建立污染物质混合输移的清晰图形，明了原理，掌握若干基本的实用计算方法。

由于各种原因，许多理工科院校的环境科学、环境工程专业未将环境水力学列入专业基础课程教学计划中，而直接让学生学习水质数学模型，进行水环境预测计算，其结果导致一些环境专业学生与年轻技术人员在使用水质模型时不顾适用条件，张冠李戴或胡乱用之时有出现，若本书对他们能有所帮助，则编者深感慰藉。

在本书编写过程中，顾莉副教授、褚克坚博士、刘晓东副教授、汪靓博士研究生等参与了部分章节的编写工作，巫丹博士、邢领航博士提出了对本书的建议，

还有博士研究生丁珏、程浩森、王玉琳以及硕士研究生惠慧、焦梓楠、王海燕等参与了编写和插图绘制工作，在此一并致以感谢！

由于编者水平有限及时间仓促，本书难免存在不妥和错误之处，盼请读者指正。

编 者

2015年5月于南京

# 目 录

前言	
第一章 绪论	1
1.1 我国水环境面临的形势	1
1.2 环境水力学的主要任务与作用	2
1.3 污染源分类	3
1.3.1 环境学科中污染源的分类	3
1.3.2 环境水力学视角的污染源分类	5
1.4 污染物在水体内输运的主要方式	6
第二章 污染物质输运方程	8
2.1 描述物质扩散输运的基本方程	8
2.1.1 扩散现象与概念	9
2.1.2 弗克扩散定律	9
2.1.3 随流扩散方程	10
2.1.4 紊流条件下的随流扩散方程	13
2.2 紊动扩散系数	17
2.2.1 紊动扩散系数的一般表达式	17
2.2.2 垂向紊动扩散系数	18
2.2.3 横向紊动扩散系数	20
2.2.4 纵向紊动扩散系数	21
第三章 简化情况下污染物浓度计算基本公式	23
3.1 静止环境中的解析解	23
3.1.1 集中瞬时源基本解	23
3.1.2 初始空间分布源的解	31
3.1.3 时间连续源的解	38
3.2 在流动环境中的扩散解析解	41
3.2.1 均匀流中的瞬时源	41
3.2.2 均匀流中的连续稳定源	44
3.3 岸边反射影响下的解析解	48
3.3.1 一维情况下的反射	48

	3.3.2 二维情况下岸边反射·····	53
<b>第四章</b>	<b>顺直中小型河道污染带特征计算·····</b>	<b>59</b>
4.1	中小型河流充分混合所需的距离计算·····	59
	4.1.1 中心排放·····	61
	4.1.2 岸边排放·····	62
	4.1.3 任意位置排放·····	63
4.2	污染物扩散到对岸所需的距离计算·····	64
	4.2.1 岸边排放·····	64
	4.2.2 中心排放·····	66
	4.2.3 任意位置排放·····	67
4.3	污染带扩散宽度·····	69
	4.3.1 宽阔水域扩散宽度计算·····	69
	4.3.2 受河岸边界影响的扩散宽度计算·····	70
<b>第五章</b>	<b>污染物分散现象与分散系数确定·····</b>	<b>78</b>
5.1	分散的概念·····	78
5.2	污染物纵向分散方程·····	79
5.3	二维明渠紊动剪切流的分散·····	84
5.4	圆管流的纵向分散·····	85
5.5	天然河道纵向分散方程及分散系数·····	91
5.6	河流纵向分散系数的估算方法·····	95
	5.6.1 理论式·····	95
	5.6.2 弗休经验公式·····	95
	5.6.3 应用示踪剂现场观测估算分散系数·····	98
<b>第六章</b>	<b>不规则水域中污染物的混合运输·····</b>	<b>105</b>
6.1	污染物质进入受纳水体后的混合过程·····	105
6.2	二维混合方程·····	106
	6.2.1 垂向平均二维混合方程·····	106
	6.2.2 累积流量形式的二维稳态混合方程·····	113
6.3	一维污染物运输的方程·····	116
<b>第七章</b>	<b>水质模型简介·····</b>	<b>119</b>
7.1	污染物在水体中的生化过程·····	119
	7.1.1 化学过程动力学·····	119
	7.1.2 有机污水生化反应动力学·····	122
	7.1.3 微生物生长动力学·····	125
	7.1.4 其他过程·····	127

---

7.2	水质模型的发展历程	129
7.3	经典的水质模型	130
7.3.1	Streeter-Phelps 模型的基本形式	130
7.3.2	Streeter-Phelps 模型的改进	134
7.3.3	生化耗氧模型	139
7.4	数值模型软件	141
7.4.1	WASP 模型	141
7.4.2	EFDC 模型	143
7.4.3	DELFT3D 模型	145
7.4.4	MIKE 模型	145
	参考文献	147



# 第一章 绪 论

## 1.1 我国水环境面临的形势

伴随着我国经济与社会的快速发展，工业化、城市化进程的不断加快，大量的污染物排入水体，对水环境造成了严重的威胁。水污染是指在人为因素直接或间接的影响下，污染物质进入水体，使其物理、化学或生物特性发生变化，以致影响水的正常用途和水生态系统的平衡、危害人体健康和生活环境。

目前全国水污染形势比较严峻，而其最直接的原因就是，大量的工业废水和生活污水被排入河流、湖泊等水域，超过了水体的承载能力，使得水质恶化。据资料显示，全国江河湖泊普遍受到污染，其中七大江河水系的 741 个监测断面水质，有 41% 为劣五类；而 75% 的湖泊出现不同程度的富营养化问题。严重的水污染造成部分地区“水质型缺水”，甚至威胁到了居民饮用水安全，比如 2007 年的太湖蓝藻事件，蓝藻暴发使得无锡市的自来水受到污染，造成居民无法正常生活。图 1-1 和图 1-2 是不同水体污染排放和事故产生的污染带照片。

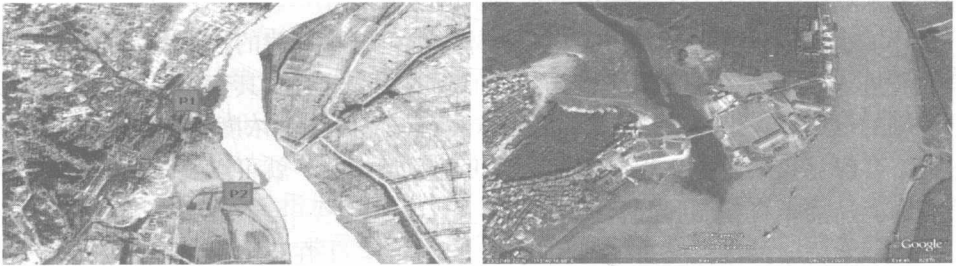


图 1-1 河道污染带

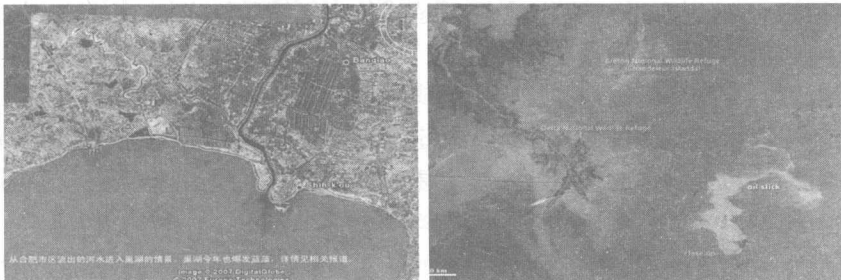


图 1-2 入湖污染带与漏溢油事故污染带（照片来源网络）

同时, 水域污染会使水生态系统的平衡被破坏, 污染会使得水质变差, 水中溶解氧浓度下降, 浑浊度增加, 营养物质富集等。严重时会出现鱼类等生物大量死亡, 水中生物种类明显减少, 藻类过量生长等问题。水域的生态平衡受到破坏, 直接影响到了水资源的可利用性, 如水产养殖、景观用水、农业灌溉用水、捕捞等, 使得区域经济的发展受到限制。

水环境污染已成为我国中央与各级地方政府高度重视的一个问题。要治理水环境首先就必须了解污染物在水体中的运输扩散情况, 预测不同控污方案产生的效果, 这样才能制定出科学合理的优化方案, 为确定污染物排放控制方案提供技术支持。

## 1.2 环境水力学的主要任务与作用

要对水体不产生影响, 污染物实现零排放是最理想的, 但是按当前的生产力与技术发展水平, 实现所有污染物零排放是不现实的。看来污染物的排放是不可避免的了, 那么污染物排入水体后的影响范围有多大、污染物究竟排多少是合理的、如何合理控制污染物排放等则成为被高度关注的、也是科学制定区域排放总量、区域环境规划和环境评价所必须回答的问题。在其背后, 需要准确预报排污后河流、湖泊和近海等水体水环境质量变化情况, 需要深入地了解污染排放入水体后的运输、迁移、扩散规律。研究污染物在水体中混合、输移的规律及其在各种环境水域中的应用, 这就是环境热力学的任务。

环境水力学是着重研究污染物在水体中混合输移规律的科学, 着力于探讨污染物进入水体后在混合输移情况下所形成的浓度分布及其变化规律, 亦即研究浓度场的形成、演化和模拟。我们若可求得已知条件下的浓度场, 就知道了各时、各地、各级污染的范围。得到了污染程度的数量指标, 就可以判断是否构成对环境有害, 从而拟订控制和改善的措施。

环境热力学的用途与价值可体现在以下方面: ①在环境影响评价和环境质量预测方面的应用, 例如, 对拟建设的项目进行环境影响评价, 需要预测拟建项目排放污染物对水环境的影响范围及可能造成的水环境质量变化。从而根据拟建项目对环境影响的程度与质量变化的大小, 可以判断拟建项目是否可行, 或提出排放控制限值。②在环境规划和管理中的应用。例如, 评估区域的纳污能力, 制定区域的环境容量或允许排放量, 优化确定污染物排放的设置, 制定区域限制排放标准, 对评估污染物排放消减后水体水质改善效果、不同治理方案进行有效性和经济性对比等。

环境水力学是环境科学与工程学科的一个重要研究分支, 它是既涉及环境领域的知识, 又涉及水力学或流体力学方面的交叉学科; 同时环境水力学也是一门

新兴的学科，其发展历史比较短，但是已经形成了自己独立的研究体系，并随着时间的推移，其研究范畴也在不断拓展，展示了强大的生命力和发展后劲。

## 1.3 污染源分类

众所周知，水是生命之源、生产之要、生态之基。水是三原子分子，分子式为  $H_2O$ ，在自然状态的水体不单是纯净的  $H_2O$  分子，它含有多种其他成分，但一般来讲，对于生物和人类而言，经过亿万年的生存适应，天然水体是无害的。本书中谈到的污染，是指我们人类的生产和生活活动导致水体中某些成分增加，造成水质恶化，对生物和生态产生危害的现象。引起水环境污染的污染源，可以是工业生产（如工厂、企业、矿山产生污水）和城市与农村的生活污水。它们有的用管道直泄江、河、湖、海；有的经过小的沟渠最终排入天然水体；广播于农田的化肥和农药，也会随着径流汇入江、河、湖泊。除此以外。一些突然事故，如企业生产事故、污水处理设施发生故障、船舶失事的漏泄、洪水的淹没和冲毁，都可能会造成大量污染物进入水体。本书将从环境水力学的角度对进行分类，以方便于后面预测计算，在此之前，我们首先了解一般污染源的分类。

### 1.3.1 环境学科中污染源的分类

按污染源的性质划分，可分为物理性污染源、化学性污染源和生物性污染源。

(1) 物理性污染是指水的浑浊度、温度和水的颜色发生改变，水面的漂浮油膜、泡沫以及水中含有的放射性物质增加等；

(2) 化学性污染是指有机化合物和无机化合物对水体的污染，如水中溶解氧减少，溶解盐类增加，水的硬度变大，酸碱度发生变化或水中含有某种有毒化学物质等；

(3) 生物性污染是指水体中进入了细菌和微生物等。主要污染源是生活污水，其中含有丰富的营养基，非常适合微生物和细菌的滋长，引起病原微生物的传播。最常见的有病菌、寄生虫卵、病毒等。生活污水是伤寒、霍乱、痢疾、蛔虫、血吸虫、呼吸道病毒和肝炎病毒等的滋生地。一般在每升污水中，肠道传染病菌可达数百万个，病毒可达 50 万~7000 万个，对人体危害极大，很容易引起疾病的蔓延和传染。

按照污染物的来源来看，主要可以分为工业污染源、农业污染源、生活污染源和交通运输污染源。

(1) 工业污染源。工业生产中会形成“三废”（废水、废气、废渣），其中废水的排放，易对水体造成严重的污染。如电镀废水中含有大量的铬、镉、铜、锌等重金属离子和氰化物，重金属会产生生物富集，富集在鱼、虾体内，人食用后

会危害中枢神经；而氰化物是致癌、致畸、致突变的“三致”物质。

(2) 农业污染源。农业污染源分布比较广，主要是由农业生产过程中不合理使用农药、化肥以及处置不当的禽畜粪便等产生的污染。如过量使用氮肥，废氮会随地下水或者沟渠进入湖泊、池塘等，造成水体富营养化。

(3) 生活污染源。城镇和农村人口会产生大量的生活废水和生活垃圾。生活废水中含有大量的洗涤溶剂成分、氮、磷。其中氮、磷可导致水体富营养化；而溶剂污染在近几年已引起关注。

(4) 交通运输污染源。汽车尾气排放中含有一氧化碳、氮氧化物、二氧化硫等物质，进入大气后又随雨水流入河流、湖泊、海域，造成污染。

水体污染物从化学角度可分为无机有害物、无机有毒物、有机有害物、有机有毒物 4 类。

(1) 无机有害物如砂、土等颗粒状的污染物，它们一般和有机颗粒性污染物混合在一起，统称为悬浮物 (SS) 或悬浮固体，使水变浑浊。还有酸、碱、无机盐类物质，氮、磷等营养物质。

(2) 无机有毒物主要有非金属无机毒性物质如氰化物 (CN)、砷 (As)，金属毒性物质如汞 (Hg)、铬 (Cr)、镉 (Cd)、铜 (Cu)、镍 (Ni) 等。长期饮用被汞、铬、铅及非金属砷污染的水，会使人发生急、慢性中毒或导致机体癌变，危害严重。

(3) 有机有害物如生活及食品工业污水中所含的碳水化合物、蛋白质、脂肪等。这类污染物因需通过微生物的生化作用分解和氧化，所以要大量消耗水中的氧气，使水质变黑发臭，影响甚至窒息水中鱼类及其他水生生物。

(4) 有机有毒物，多属人工合成的有机物质如农药 DDT、六六六等、有机含氯化合物、醛、酮、酚、多氯联苯 (PCB) 和芳香族氨基化合物、高分子聚合物 (塑料、合成橡胶、人造纤维)、染料等。

从污染的形成过程来看，可将污染源分为点源污染和非点源污染：

(1) 点源污染。有固定排放点的污染源，如工业废水、城市生活污水都由城市管网收集经污水处理厂处理后，由排放口集中排入自然水体。其具有可识别的位置，可与其他污染源区分。

(2) 非点源污染。经降水、径流冲刷或大气沉降作用，溶解的或固体污染物从非特定区域汇入受纳水体引起的水体污染，如土壤泥沙颗粒、农药、养殖废水等。

在环境学中，污染物达到一定浓度后，能对水体的物理、化学及生物属性产生不利影响的化学或生物类物质，从这个角度还可分为：

(1) 营养物质。是指有机生物体生长所必需的化学元素或者化合物。氮、磷、二氧化碳和硅是藻类生长和存活所必需的基本营养物质。硅只对硅藻非常重要。营养物质一般不能被称为污染物，但过量的营养物质存在于水体中时，会引起水

体富营养化,造成藻类水华、水体透明度下降和缺氧,进而损害水质和水体生态系统。所以当营养物质的浓度过高,对水生野草和藻类形成过度刺激时,营养物质将被视为污染物质。水体中,营养物质的考量参数主要为氨氮、总磷、总氮等。营养物质可以在生物和水环境间形成水生系统循环过程,如氮循环、磷循环;也可以通过点源和非点源进入水体中,如污水排放、工业废水、农业灌溉和城市排污等。

(2) 病原体。是指引发疾病的微生物,包括细菌、病毒和原生动物。病原体能够通过皮肤接触或被污染的饮食感染人类。这些微生物可以由多种途径进入水体,比如通过农业或城市径流、运转失常的化粪池或污水处理厂以及暴雨期间未被处理的排水和厕所复合下水道的溢流。

(3) 有毒物质。是指能对人类健康和环境造成短期或长期危害的物质,有毒有机化合物(TOCs)和重金属是自然界中两类主要的有毒物质。地表水中主要存在的有毒物质有重金属、多环芳香碳氢化合物(PAHs)、多氯联苯(PCBs)和杀虫剂等。由于工业和农业上长期的排放和使用,TOCs和重金属被大量累积在环境中,在水中溶解成为溶解态,或者被水底沉积物吸附形成颗粒态。溶解态的部分能随水流运动,颗粒态也能在水动力的作用下迁移,或者释放成为溶解态。有毒物质经过的另一个环境过程是生物积累和生物放大。经过生物积累和生物放大,有毒物质从低浓度的水体转移到高浓度的动物体内,某些动物组织中的TOCs浓度可超过周围水体浓度的上千倍。TOCs来自于人工合成,大多是难降解的,会在环境中长期积累。而重金属污染除了上述特点外,由于其自然背景(常常来源于岩石和矿物的溶解),污染更普遍和持久。采矿区周围的土壤,城市污水处理厂、工业污水、垃圾场渗漏和非点源径流中都可能存在重金属污染。

### 1.3.2 环境水力学视角的污染源分类

现在,我们从环境水力学的角度,即从影响在水体中输运过程方面,来观察上面列举的这些污染源,以进行分类。

(1) 以污染物进入水体的时间过程来分类。污染物在很短时间内泄入水体的,称瞬时源,如短时间内漏泄事故的污染源。污染物持续泄入水体的,称为时间连续源,例如工厂的废水排出口。时间连续源又可分为恒定源和非恒定源(又称稳定源或非稳定源)。恒定源是指污染物质的排放速率恒定。

(2) 以污染源相对于被污染的环境水体的空间关系来分类。对于所讨论的问题,源占有的空间尺度相对很小,可以当作一个点而不致影响精度时,这个源称为点源。如果源在空间上分布成一线,占有有一定长度,或者分布成一定面积,或者一定体积,而对于所讨论的问题,源的这种空间分布情况又不允许忽视的时候,就必须把它们作为“线源”、“面源”或“体源”。

(3) 以混溶了污染物质的污水进入环境水体最初阶段的运动性状来分类。射

流, 污水相对于环境水体具有附加的动量, 例如: 通过提升泵站的城市排污口排入江河的污水, 出口流速较高, 而且往往与河水流向成一交角。羽流, 污水的密度小于环境水体的密度, 因而具有浮力。许多情况下, 污水同时具有动量和浮力, 则称为浮射流。随流, 污水没有附加动量和浮力, 污染物质进入环境水体后, 就随着水流一起运动。实际的污染源, 常常是上述各种情况的不同组合, 因此是多种多样的。

同样, 我们从环境水力学的角度来关注各类污染物质, 会对污染物的下面这些特性更为关心, 因为它们将会影响其混合输运, 或表现上影响着混合输运。

(1) 污染物质的比重。一般地说, 污染物的比重大于水者发生沉淀作用, 污染物的比重小于水者会浮升到水的表层, 这两类污染物在水内垂向上将产生不均匀分布及分层。污染物比重和水十分接近者, 能和水混为一体, 称为中和性物质。

(2) 污染物的质量会不会起变化, 即其质量会不会增加或减少、在什么条件下发生变化等。例如, 许多有机物可以被氧化分解而减少, 水中的溶解氧(通常用 DO 代表)可以因有机物氧化而消耗, 也可以通过水面吸收空气中的氧及因水中藻类呼吸而恢复(通常称复氧)。而质量不增减的称为守恒物质(也有称保守物质)。

(3) 物质的其他物理化学性质。例如, 是溶解质, 还是混悬体、胶体, 会不会发生吸附、絮凝作用等, 也影响混合输移过程。

## 1.4 污染物在水体内输运的主要方式

在不考虑化学作用与生物作用情况下, 污染物质排入环境水体后, 主要通过如下几种主要方式在水体中输移, 并与水体混合。

(1) 随流输移(advection)。当环境水体处于流动状态时, 污染物质随着水体的质点一起迁移到新的位置。

(2) 对流输移(convection)。由于温差或密度分层产生浮力作用而引起物质在垂直方向或水平方向的对流输移。

(3) 扩散(diffusion)。包括分子扩散(molecular diffusion)和紊动扩散(turbulence diffusion)。分子扩散: 在静止或流动的水体中, 由于分子随机运动(布朗运动)引起的物质迁移。当水体内污染物浓度不均匀时, 即存在浓度差梯度时, 污染物将从浓度高的地方向浓度低的地方迁移或扩散。紊动扩散是在紊动水流中由于流体质团的紊动而产生的扩散现象。紊动扩散比分子扩散快而且强烈。

(4) 剪切分散(dispersion)。实际水流在横断面或垂向流速分布不均匀, 亦即在横向或垂向有流速梯度存在, 这种流动可称为剪切流。在剪切流横向断面或垂向上的不同点处, 污染物质随流输移的速度各不相同, 横向或垂向的平均的污染物浓度会因此而随流改变。这种剪切流作空间平均的简化处理而引起的附加的

物质离散现象，叫做剪切分散（dispersion of shear flow）。

污染物在水体中的几种输移方式往往交织在一起，通过这些输移方式，污染物与周围水体不断混合，其浓度不断降低。

在实际情况下，污染物质排入的环境水体可以是河流、湖泊、河口、近海、水库、人工渠道等等，由于受着水文规律和水体边界的制约，以上环境水体的水力特性各不相同，如：河道流量有洪水季和枯水期的不同；河道由于存在顺直道和弯道水流结构不同；湖泊往往有风生环流；深水水库会形成分层流或异重流；河口区存在盐淡水交汇；近海有涨落潮及大小潮等。环境水体水力学特性的差异对污染物的混合输移起着重要的作用。某些情况下甚至是决定性的作用。由于该内容不属于本课程的范畴，因此必须提醒的是，在研究具体环境问题时，必须仔细认真研究环境水体的水力学特征（读者可查阅相关书籍，本教材不再作具体介绍）。

总而言之，正是由于污染源时空不同，污染物质的特性各异和环境水体水力学特性的千差万别，组合成了丰富多彩的实际问题，也是环境水力学仍然需要不断探索研究的方向。

### 思考题

- 1) 环境水力学的主要任务与作用是什么？
- 2) 从环境力学的角度，污染源是如何分类的？
- 3) 污染物在水体内输运、混合的主要方式有哪些？

## 第二章 污染物质输运方程

环境水力学的任务就是要求回答污染物在水体中的混合、输移的规律。当排入环境水体中后，污染物质究竟在环境水域中是如何运动的，对水体污染情况怎样，污染带的范围大小是多少（图 2-1），污染场浓度分布是多少，这些问题是我们最关心的。知道了污染物在水中的浓度分布，就可以对污染物排放的总量控制、环境保护规划方案、工程设计提供定量的判断。

那么，污染物在水体中输移扩散是否有一定规律可循？回答是肯定的，这种规律就需要用数学语言来描述，这就是物质扩散输运的基本方程。

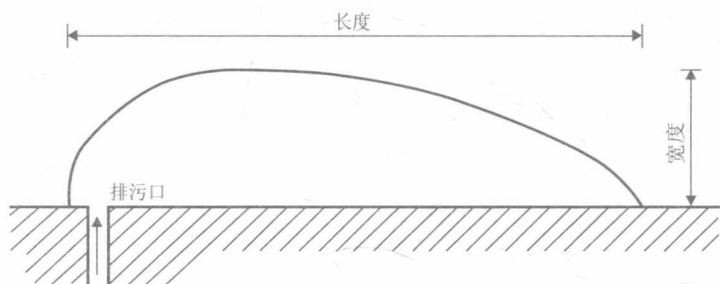


图 2-1 污染物排放后污染带示意图

### 2.1 描述物质扩散输运的基本方程

污染物质排入环境水体后，将发生扩散，并随着环境流体一起运动，见图 2-1 所示。污染物质扩散包括由分子运动引起的分子扩散（molecular diffusion）及由流体紊动引起的紊动扩散（turbulent diffusion）。同时污染物质伴随着环境水体一起运动，在流场中从一处转移到另一处，这个过程称为随流输移。因此我们常常把物质发生传输的过程分解为由物质随同流体质点时均运动的随流输移、分子扩散以及紊动扩散。

如果我们能够知道描述随流输移扩散的数学表达式，就可以掌握污染物在水体中输移扩散规律，比如，我们坐动车从南京到上海，早上 8 点钟出发，知道动车的车速是 250km/h，那么我们就知道 8 点 1 刻动车的位置，因为我们知道了描述动车运动的数学描述，即距离等于速度乘时间  $S = vt$ ，因此要掌握污染物在水



体中输移规律，就要知道描述随流输移的数学表达式，即描述物质扩散运输的基本方程。在推导基本方程之前，首先简要讨论一下扩散现象。

### 2.1.1 扩散现象与概念

在自然界中存在着物质扩散现象，污染物质会发生扩散，这是自然规律。浓度梯度引起的扩散是最直观的传质现象，作为物理学名词的扩散，是由物理量梯度引起的使该物理量平均化的物质迁移现象。

物质由于分子的无规则运动从高浓度区到低浓度区的净流动过程称为分子扩散。扩散现象是我们日常生活中常见的现象。如图 2-2 所示，如果在玻璃杯中放入一滴红墨水，尽管我们什么也没做，红墨水经过一段时间就慢慢散开了，这是墨水分子在水中扩散的结果；在静止水塘中，排入一团污水，没有任何人为的干预，可以看到污染水团向四周扩散的现象，而且扩散是三个方向，即为三维扩散。这种由于分子运动引起的扩散称为分子扩散，在水体中存在浓度差是产生分子扩散的必要条件。

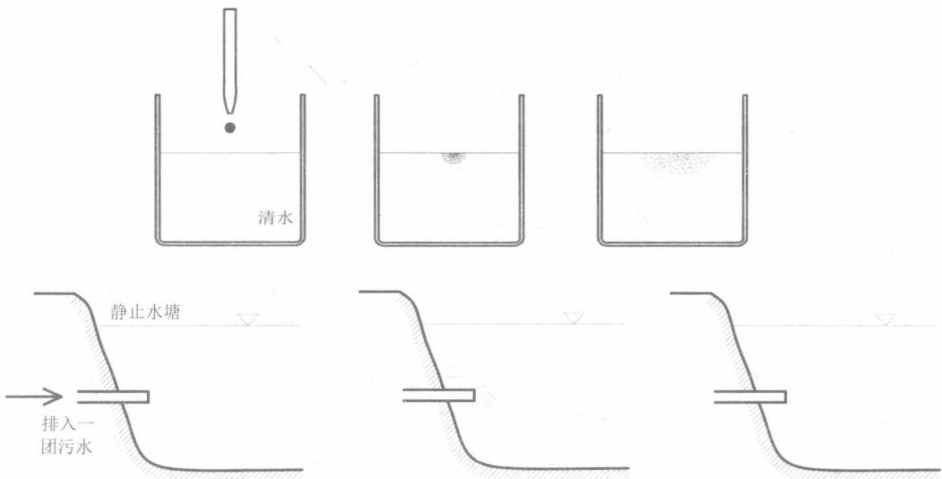


图 2-2 扩散现象

### 2.1.2 弗克扩散定律

首先提出分子扩散理论的是德国生理学家弗克 (Fick, 1855 年)。他从热传导理论得到启发，认为热在导体中的传导规律可以适用于盐分在溶液中的扩散现象。