

SHUIWURAN DONGLIXUE HE SHUIWURAN KONGZHI

水污染动力学和 水污染控制

湖南省环境保护科学研究院 张玉清 著



化学工业出版社

X52
58

水污染动力学和 水污染控制

湖南省环境保护科学研究所 张玉清 著



化学工业出版社

·北京·

本书以水污染动力学和水污染控制为主题,较全面系统地讨论了与水污染有关的水流动力学和化学动力学基本概念、基本原理和基本方程等内容;对水污染物在河流、湖泊等天然水体的水污染过程动力学进行了分析研究。根据污染物在天然水体中受水动力和化学反应动力学综合作用的结果,推导和建立了污染物受水动力学和化学动力学综合影响的迁移转化速度方程和动力学方程,并在此基础上研究了在天然水体的水域功能区实施容量总量控制的原理、方法和原则,以适应国家在天然河流和湖泊等天然水体推行容量总量控制的需要。

本书适合从事水环境管理、水污染控制、水环境工程的科研和工程技术人员使用,也可作为环境、水利等专业的研究生和高年级学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水污染动力学和水污染控制/张玉清著. —北京:
化学工业出版社, 2006.7

ISBN 978-7-5025-9185-4

I. 水… II. 张… III. ①水污染-水动力学②水
污染-反应动力学③水污染-污染控制 IV. X52

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第088590号

水污染动力学和水污染控制

湖南省环境保护科学研究院 张玉清 著

责任编辑:董琳 管德存

文字编辑:刘莉瑄

责任校对:郑捷

封面设计:胡艳玮

*

化学工业出版社出版发行

(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

购书咨询:(010)64518888

购书传真:(010)64519686

售后服务:(010)64518899

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

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 14¼ 字数 358千字

2007年1月第1版 2007年1月北京第1次印刷

ISBN 978-7-5025-9185-4

定价:36.00元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

本书的核心内容是“水污染动力学和污染物迁移转化规律”（第三篇）和“水污染控制的原理和方法”（第四篇），为作者的研究成果。而“水污染水流动力学基础”（第一篇）和“水污染化学动力学基础”（第二篇）为前人积累的与水污染动力学和水污染控制研究及应用有关的基础知识。对水环境系统而言，前后构成一个整体，有了第一篇和第二篇可使第三篇和第四篇的内容更清晰，更便于理解和应用。

总体来讲，水污染动力学是研究水污染过程动力学的科学，或者说它是研究污染物在天然河流或湖泊水体中的水流动力学和化学动力学过程综合效应的科学，因此对水污染过程而言它是水流动力学和化学动力学的交叉学科。水流动力学和化学动力学是它的基础。

水污染动力学是研究污染物在水环境中的时空变化速度以及其他各种因素对这种变化速度影响的科学。它是水污染控制的理论基础，它是为适应水环境保护、水环境污染控制和水环境工程实践的需要而派生出的一门水环境科学分支学科。在环境科学各个分支领域的研究中，经常会涉及到的一个问题是物理的，化学的，生物的环境污染因素随时间或空间的变化速度和范围以及其他环境因素对这种变化的影响和作用的大小。同时，在研究环境污染时，不但要关注在环境中有些什么污染物，它们会发生什么样的时空变化，而且要关注这些污染物进入环境之后种种变化的速度和范围，以及有些什么因素会影响这些变化速度，和影响到什么程度。所有这些对于研究控制环境污染的对策和措施是十分重要的。

为了实现水污染的精确和有效的定量控制，必须切实了解污染物在进入水环境之后所发生的各种物理迁移和化学与生物化学转化过程的规律，以及由于这些过程综合作用的结果所造成的污染范围和污染影响程度。必须对各种过程进行过程动力学定量分析，使其定量化、公式化。因此，水污染动力学的任务是将污染物在水环境中所发生的过程公式化、定量化。因此，水污染动力学和水污染控制研究是关系密切，相互依存的。水污染动力学是水污染控制的理论基础，水污染控制是水污染动力学应用于水污染控制和环境管理与环境工程实践的目的和重要途径。

今天提出这个问题加以研究，一方面是因为水污染控制和水环境工程及水环境管理实践已经为水污染动力学研究积累了丰富的现有资料，提供了许多研究方法。另一方面是因为水污染控制和水环境工程及水环境管理实践为水污染动力学研究不断提出许多新的研究课题和研究内容，促进这个学科的不断完善，不断丰富和不断发展。因此，水污染动力学不仅是在水污染控制和水环境工程及水环境管理实践中产生，丰富和发展起来的，而且也是为适应水环境科学的需要而发展起来的。因为水环境科学的发展需要有一个理论指导，大量事实表明水污染动力学不仅仅是水污染控制、水环境管理和水环境工程的理论基础，而且也是环境化学、环境生物学、环境物理学的许多基础研究应用于水污染控制的目的和结果。因此，无论从实际应用的角度还是从理论研究的角度，现在对水污染动力学进行系统的研究不但是必要的，而且是可能的。

在本书中不准备首先从纯理论上进行全面的、系统的加以讨论，并建立其独立完整的体系。本书仅就与水污染动力学的应用有密切关系的内容，围绕着水污染控制这一主题进行研究和讨论。亦即根据天然水体中的水污染规律研究水环境保护的原理、方法和途径；

探索水污染控制的原则与方法。根据环境管理和环境工程实践提出的要求,对水污染动力学的基本原理和规律进行探索和研究。以水污染动力学的基本原理和规律指导水环境管理和水污染控制实践。沿着理论联系实际的路线为水污染动力学的形成、发展和完善作一些基础性的探索工作。

本书的内容是作者根据过去 25 年参与“六五”、“七五”、“八五”、“九五”国家科技攻关有关研究项目的理论与实践内容,进行全面、系统的理论总结,并据此所研究的一套在河流和湖泊的混合区和功能区具体实施容量总量控制的原理和方法,而撰写出的。因为,容量总量控制,完整地反映了污染源与保护目标这一系统的输入——响应关系。在实施优化控制污染源的种种方法中,可以包含目标总量控制和行业总量控制。这一研究成果是水污染动力学理论探索和水污染控制实践相结合的结果,是多学科交叉的结果,是流体力学、化学动力学、数学、环境化学、环境工程学等多学科交叉研究的结果。

要对一段河道进行精确、有效的总量控制,其关键是建立能正确而客观地描述污染物在河流水体中迁移运动规律的水质模型。由河段的水文、水力学条件、排污条件等所决定的污染物迁移转化规律,不仅是河流水域功能区划分的科学依据,同时也是确定和分配容量总量的科学基础。为了实施容量总量控制,本书在研究天然河流一般特性和规律的基础上,重点研究了在具体河段划分混合区和功能区的原理和方法;在混合区和功能区确定控制断面或控制点的原理和方法;在控制点(污染带)或控制断面(均匀混合段)确定和分配负荷总量的原理和方法。根据河流功能区容量总量控制的技术要求,作者研究和解决了容量总量控制中一系列重要的理论和技术问题。其中,建立了重金属、有机物、热污染物、酸碱污染物的水质模型,解决了有关重金属和有机物污染物在污染带的浓度分布计算和排污口排放强度控制计算的理论公式和计算方法,热污染带水温分布和酸碱污染带 pH 值分布预测和控制计算的理论公式和计算方法,以及与污染控制有关的重要参数——横向混合系数与水力参数的定量关系理论关系式,污染带长度、宽度、面积以及混合区和功能区范围的计算方法,混合区及功能区与整个污染带的范围内污染物分布总量计算的理论公式与计算方法等。完善了水质预测和水污染控制定量计算方法系统。填补了该领域的一系列空白,解决了一系列具体的理论和技术问题,对国家推行容量总量控制提供有力的技术支持,上述成果均属国内外首创。

全书共分 15 章,第 1 章对天然水体的一般特性和规律,对与水污染控制有关的流体力学基本概念、基本原理和基本方程进行讨论和分析。第 2 章对与水污染控制有关的水流的紊动和扩散现象及其基本概念、基本定理和基本方程进行了分析研究。第 3 章对天然河流的流速分布和阻力以及与水污染控制有密切关系的管流与明渠流的流动规律和阻力损失等进行了讨论和分析。第 4 章对有关污染物在天然水体中的化学反应类型和化学反应速度的基本概念、基本规律和基本定理进行分析和讨论。第 5 章对与水污染控制有关的化学反应速度计算方法、基本公式及基本理论进行了讨论和分析。第 6 章讨论和分析了多相反应动力学和在流动体系中的化学动力学。第 7 章对污染物在天然水体中随水、悬浮物、底泥迁移转化的水动力学和化学动力学过程进行了综合分析,建立了污染物随水、悬浮物、底泥迁移转化基本方程。第 8 章根据天然河流和湖泊污染带的边界条件,对污染物随水、悬浮物、底泥迁移转化方程的求解方法及计算方法进行分析和研究。第 9 章对水污染动力学的实验研究和原体观测情况进行分析和讨论。第 10 章对总量控制的基本概念、内容、特点,应用条件,主要基础工作和实施步骤,以及总量控制与国家八项管理制度的关系进行了综合性论述和介绍。第 11 章对污染物在天然水体中的迁移转化基本方程的解析求解方

法与过程进行了论述。第 12 章对总量控制中几个重要相关参数,即横向混合系数、污染带等浓度线的最大长度、最大宽度、面积以及污染带混合区与功能区的最大长度、宽度、面积和污染带混合区与功能区内分布总量计算的原理和方法进行了论证。第 13 章重点论述了热污染带水温和酸碱污染带 pH 值分布预测及控制计算的原理和方法。第 14 章论证了确定容量总量的原理和方法。第 15 章论述了分配容量总量的原理和方法。

本书主要面向下列几个方面的读者。

(1) 从事水环境管理,水污染控制及有关法规、标准及规划制订机构的领导、管理干部和工程技术人员。

(2) 从事水域功能区划分,排污总量控制,排污收费和环境工程设计等方面工作的管理干部和工程技术人员。

(3) 大专院校有关专业的师生及研究机构有关科研人员。

我国的环境管理和污染控制理论与技术正处在形成和发展的过程中,本书的基本内容是作者近 25 年的研究成果和认识,其中的缺点和不妥之处难免,甚盼读者加以斧正。

能写成此书得益于国家环保总局和湖南省环保局的支持,湖南省环保所完成了国家环保总局和湖南省环保局一系列重要的、具有远见卓识的国家科技研究项目。在成书的过程中,得到有关领导、同事及家人的鼓励和支持,在此致以衷心的感谢。

作 者
2006 年 3 月

本书主要符号表

序号	符 号	含 义	单 位
1	X, Y, Z	笛卡儿坐标系	
2	x, y, z	笛卡儿坐标, 分别表示纵向、横向、竖向距离	m
3	P_x, P_y, P_z	在 x, y, z 方向单位面积扩散物质的输送率	mg/s
4	dx, dy, dz	微小六面体空间的边长	m
5	D_m	分子扩散系数	m^2/s
6	$C_j (j=1, 2, 3)$	某扩散物质浓度	mg/L
7	U, V, W	流速, 矢量, 在 x, y, z 方向的分量	m/s
8	$j (j=1, 2, 3)$	污水中某一污染物	
9	\vec{V}	水中污染物移动速度, 矢量	m/s
10	\vec{q}	底泥移动速度, 矢量	m/s
11	q_x, q_y, q_z	底泥移动速度, 矢量, 在 x, y, z 方向的分量	m/s
12	C_d, C_s, C_m	溶解态、悬浮态、底泥态污染物浓度	mg/L
13	C	溶解态和悬浮态总浓度	mg/L
14	P_{dx}, P_{dy}, P_{dz}	溶解态污染物在 x, y, z 方向单位面积的输送率	mg/s
15	P_{sx}, P_{sy}, P_{sz}	悬浮态污染物在 x, y, z 方向单位面积的输送率	mg/s
16	$\vec{P}_{mx}, \vec{P}_{my}, \vec{P}_{mz}$	底泥态污染物在 x, y, z 方向单位面积的输送率	mg/s
17	$\vec{P}_d, \vec{P}_s, \vec{P}_m$	溶解态、悬浮态、底泥态污染物在水体中的输送率速度, 矢量	m/s
18	K_1	吸附速率系数	s^{-1}
19	$C_i (i=1, 2, 3)$	某吸附边界层污染物浓度	mg/L
20	K_b	污染物在悬浮物和水中的分配系数	L/kg
21	q_0	污染物在悬浮物上的平衡吸附量	mg/kg
22	θ	单位水体中悬浮物的含量	kg/L
23	f_1	污染物在底泥和水中的分配系数	L/kg
24	r	底泥的相对密度	kg/L
25	K_2	解吸速率系数	s^{-1}
26	ω_0	悬浮物在静水中的沉降速度	m/s
27	K_0	再悬浮系数	
28	ω	$\omega = (1 - K_0)\omega_0$ 综合沉降速度	m/s
29	K_3	污染物化学转化速率系数	s^{-1}
30	$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	x, y, z 方向的时均流速	m/s
31	u', v', w'	x, y, z 方向的脉动动速	m/s
32	$\bar{C}_d, \bar{C}_s, \bar{C}_m$	溶解态、悬浮态、底泥态污染物浓度的时均值	mg/L
33	C'_d, C'_s, C'_m	溶解态、悬浮态、底泥态污染物浓度的脉动值	mg/L
34	$\bar{q}_x, \bar{q}_y, \bar{q}_z$	x, y, z 方向底泥移动速度的时均值	m/s

续表

序号	符 号	含 义	单 位
35	q'_x, q'_y, q'_z	x, y, z 方向底泥移动速度的脉动值	m/s
36	ρ	流体密度	kg/L
37	$\overline{u_x c'_d}, \overline{u_y c'_d}, \overline{u_z c'_d}$	x, y, z 方向单位面积单位时间溶解态污染物输送量时均值	mg/s
38	$\overline{u_x c_s}, \overline{u_y c_s}, \overline{u_z c_s}$	x, y, z 方向悬浮态污染物单位面积单位时间输送量时均值	mg/s
39	$\overline{u_x c'_m}, \overline{u_y c'_m}, \overline{u_z c'_m}$	x, y, z 方向底泥态污染物单位面积单位时间输送量时均值	mg/s
40	M'_x, M'_y, M'_z	x, y, z 方向横向扩散系数	mg/s
41	M_x, M_y, M_z	x, y, z 方向综合横向混合系数	m ² /s
42	k	综合衰减系数	s ⁻¹
43	B	河宽	m
44	H	水深	m
45	π	圆周率	
46	m	排放强度 ($m = C_p Q_p$ 或 $m = C_0 V_0$)	g/s
47	C_b	水体中污染物背景浓度	mg/L
48	C_h	水体中污染物环境标准浓度	mg/L
49	m_d, m_s, m_m	溶解态、悬浮态、底泥态污染物排放强度	g/s
50	K'_1, K''_1	综合吸附系数 ($K'_1 = K_1 K_b \theta; K''_1 = K_1 f_1 r$)	s ⁻¹
51	K'_2, K''_2	综合解吸系数 ($K'_2 = K_2 K_b \theta; K''_2 = K_2 f_1 r$)	s ⁻¹
52	C_0	一维河流初始断面平均浓度	mg/L
53	V_0	一维河流初始断面平均流量	m ³ /s
54	C_p	排污口平均浓度	mg/L
55	Q_p	排污口平均流量	m ³ /s
56	T	热污染水温	℃
57	u_x, u_y, u_z	x, y, z 方向的流速	m/s
58	T_p	排污口水温	℃
59	T_h	河流水温背景值	℃
60	ρ_p	热废水密度	kg/L
61	c_p	热废水比热容	J/(kg·℃)
62	Q	热废水流量	m ³ /s
63	c	河水的比热容	J/(kg·℃)
64	ρ	河水密度	kg/L
65	a	排污口距岸边距离	m
66	\dot{m}	允许排放强度	g/s
67	x_0	污染带最大长度	m
68	y_0	污染带最大宽度	M
69	T_b	水温控制标准	℃
70	x_b	功能区和混合区最大长度	m
71	y_b	功能区和混合区最大宽度	m

续表

序号	符 号	含 义	单 位
72	A_0	污染带面积	m^2
73	A_b	功能区和混合区面积	m^2
74	pH	pH 值(氢离子浓度的负对数值)	
75	p(OH)	p(OH) 值(氢氧根离子的负对数值)	
76	k_1	碳酸一级电离常数	
77	k_2	碳酸二级电离常数	
78	k_{h1}	碳酸盐一级水解常数	
79	k_{h2}	碳酸盐二级水解常数	
80	k_w	水的离子积常数	
81	pk_1	一级电离常数的负对数	
82	pk_2	二级电离常数的负对数	
83	pk_w	水离子积常数的负对数	
84	pH	加酸加碱前原有 pH 值	
85	pH'	加酸加碱后的 pH 值	
86	ΔpH	pH 值变化值	
87	ΔB	排入碱性废水后形成的当量浓度	mgN/L
88	$\Delta A (= -\Delta B)$	排入酸废水后形成的当量浓度	mgN/L
89	[碱]	碱度	mgN/L
90	u'_x, u'_y, u'_z	作横向动量传递的脉动流速	m/s
91	$\overline{u_x}, \overline{u_y}, \overline{u_z}$	时均流速	m/s
92	\overline{p}	时均压强	N/m ²
93	$\overline{X}, \overline{Y}, \overline{Z}$	质量加速度	m/s ²
94	ν	运动黏滞系数	m ² /s
95	ϵ	紊动黏滞系数	m ² /s
96	$u'_{xz}, u'_{yz}, u'_{zx}$	作纵向动量交换的脉动流速	m/s
97	G	重力加速度	m/s ²
98	L	普朗特混合长度	m
99	K	卡门常数	
100	M_x, M_y, M_z, M	纵向、横向、竖向混合系数	m ² /s
101	$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$	切应力	N/m ²
102	u_s	剪切流速	m/s
103	b	污染带质量中心距岸边距离	m
104	H_1	排放断面平均水深	m
105	u_1	排放断面平均流速	m/s
106	H_2	控制断面平均水深	m
107	u_2	控制断面平均流速	m/s
108	L_0	混合过程段长度	m

续表

序号	符 号	含 义	单 位
109	$y(y=2b)$	混合过程中污染带宽度	m
110	A	污染带面积	m ²
111	M	污染带分布总量	kg
112	M_r	纵向离散系数	m ² /s
113	C_1	初始断面平均浓度	mg/L
114	C_2	控制断面平均浓度	mg/L
115	r	污染带积分区域概率常数	
116	M_1, \dot{M}_1	纵向分区在混合区的实际分布总量和允许分布总量	kg
117	M_2, \dot{M}_2	横向分区混分区加功能区的实际分布总量和允许分布总量	kg
118	M_3, \dot{M}_3	功能区的实际分布总量和允许分布总量	kg
119	ΔM_3	功能区分布总量削减量	kg
120	M'_1, \dot{M}'_1	纵向分区在混合区加功能区的实际分布总量和允许分布总量	kg
121	M'_2, \dot{M}'_2	纵向分区在混合区加功能区的实际分布总量和允许分布总量	kg
122	M'_3, \dot{M}'_3	功能区的实际分布总量和允许分布总量	kg
123	$\Delta M'_3$	纵向分区功能区分布总量削减量	kg
124	M_0	各工厂实际排放强度之和	g/s
125	X_0	各工厂污染长度之和	m
126	A_0	各工厂污染面积之和	m ²
127	M_s	功能区实际纳污总量	kg
128	\dot{M}_s	功能区允许纳污总量	kg
129	ΔM_s	功能区纳污总量削减量	kg

目 录

第一篇 水污染水流动力学基础	1
第 1 章 水流动力学的基本概念和基本规律	1
1.1 液体的基本特征和主要物理性质	2
1.2 作用于液体的力	4
1.3 静水力学的基本原理和规律	5
1.4 动水力学的基本原理和规律	8
1.5 液体运动的连续方程和平面势流	13
1.6 液流运动的微分方程	15
第 2 章 水流的紊动和扩散现象及基本规律	18
2.1 水流内部运动的几种形式	18
2.2 水流的紊动及基本概念	19
2.3 紊流的时均流动及其运动方程	27
2.4 水流的扩散现象及基本规律	29
第 3 章 管流和明渠流的性质和规律	37
3.1 管流的性质和规律	37
3.2 明渠水流的性质和规律	41
3.3 水流的流速分布及阻力	46
3.4 河流泥沙冲淤的主要性质和规律	51
第二篇 水污染化学动力学基础	59
第 4 章 水污染化学动力学	59
4.1 引言	59
4.2 化学反应速率的表示方法及其测定原理	60
4.3 反应物浓度对反应速率的影响	62
4.4 简单反应的反应动力学方程式	64
4.5 典型复杂反应的动力学分析	72
4.6 反应机理的确定	78
第 5 章 化学反应速率理论及其研究现状和发展前景	82
5.1 温度对反应速率的影响	82
5.2 关于反应速率理论的发展与现状	85
5.3 反应速率理论对溶液中反应的实用性	89
第 6 章 多相反应动力学和流动体系中的化学动力学	92
6.1 多相反应动力学	92
6.2 流动体系中的化学动力学的基本概念和基本公式	96
6.3 生物化学反应动力学	99
第三篇 水污染动力学和污染物迁移转化规律	107
第 7 章 水污染过程的动力学定量分析和污染物迁移转化方程	107

7.1	水质模型的研究概况	107
7.2	水污染过程动力学定量分析和污染物迁移转化基本方程	109
第8章	基本方程的解析求解和天然河流污染带水质模型	118
8.1	基本方程的求解方法研究和解析解法实例	118
8.2	湖泊岸流污染带和小溪河水质模型研究与应用	126
8.3	天然河流热污染带和酸碱污染带水质模型研究与应用	132
第9章	模型的实验研究和原体观测情况简述	140
9.1	模型的计算方法和原体观测研究情况	140
9.2	参数识别	142
9.3	河流污染带的原体观测和示踪实验研究情况	145
9.4	湘江霞湾江段污染带水质模型推广应用研究	147
	本篇参考文献	148
第四篇	水污染控制的原理和方法	149
第10章	总量控制的基本概念与基本规定	150
10.1	总量控制的基本概念	150
10.2	总量控制的特点与基本条件	153
10.3	总量控制的主要基础工作和实施步骤	154
10.4	总量控制与国家八项管理制度的关系	159
第11章	污染源与环境保护目标的输入响应定量关系	162
11.1	水质模型的性质和类型及适用范围分析	162
11.2	水质模型选用	166
11.3	水质模型结构的简化及验证结果	167
第12章	水污染控制中几个重要参数和指标的研究与计算	170
12.1	根据雷诺方程组的封闭和求解计算横向混合系数	170
12.2	根据边界反射原理计算污染范围和横向混合系数	177
12.3	重金属和有机物污染带和混合区及功能区范围计算的原理和方法	180
12.4	采用积分法计算污染带面积的原理和方法	183
12.5	用二重积分法计算污染带分布总量的原理和方法	185
第13章	热污染带与酸碱污染带的水质预测与污染控制计算	187
13.1	天然河流热污染带水质模型及其水质预测和污染控制计算	187
13.2	天然河流酸碱污染带水质预测和污染控制计算	190
第14章	计算容量总量的原理和方法	197
14.1	技术规定	197
14.2	污染带浓度场分布规律和水污染控制的原理和方法	199
14.3	计算混合区和功能区容量总量的原理和方法	200
14.4	均匀混合段的水质模型和总量控制计算	204
第15章	总量的分配	207
15.1	总量的分配原则	207
15.2	总量的分配方法	208
	本篇参考文献	212

第一篇 水污染水流动力学基础

当污染物进入天然河流、湖泊等天然水体发生水污染后，在进行水污染动力学和水污染控制研究与实践的过程中，会遇到的一个基本的问题是发生水污染的水文和水力学特点是什么，遵循什么规律，主要研究的内容是什么。回答是：首先必须了解水体的运动规律，以及污染物进入水体后的总体运动规律，将水污染流体力学作为水污染动力学的基础之一。因为就水污染的水文特点而言，在研究复杂的水污染问题时，必然要遇到下列两个客观因素，一是工业、农业及生活废水的排放（或流出）情况，一是承纳这些废水的水体本身的运动规律。

工业及城镇生活废水的排放动态，主要决定于工业生产及城镇生活规律，至于农业废水的流出，则和暴雨冲刷、产流、汇流等水文规律和农田管理（施用化肥、农药、耕作制度）及灌溉制度（影响农业灌溉用水）有关，具有独特的污水水文特性。

承纳废水的水体本身由于受到自然（如气候及地形等）及人类（对水的利用）的影响，也各具不同的水文特点。就河流而言，流量随时间变化有稳定流与不稳定流之分；流速沿程变化有均匀流与不均匀流之别；河流水文状况在日、年内、年际是变动的，尤其是在暴雨洪水时变化更为急剧。

废水流入水体后，由于稀释和扩散作用而和水体的水进行混合，伴随着进行输送并发生自净过程。因此，对水体运动总体特性与规律的研究，尤其是污水进入水体后，与水体活动规律作为统一体来研究，就显得特别重要，这就提出了水文科学和环境科学相互渗透的新课题，即环境水文学。

另外，就水体污染的水力特性而言，水污染物进入水体后，除服从总体（宏观）的水流运动规律外，也受水流内部（微观）运动的支配，这是环境水力学研究的重要内容。所谓水流内部运动，主要指紊流。

紊动水流的重要特征之一是它具有扩散能力，其扩散能力的大小，可利用紊动扩散系数来表征。在静止水体或层流中，有分子扩散系数。如果紊动水流的雷诺数 Re 在 10^4 左右，其扩散系数约为分子扩散系数的 3×10^2 倍，例如在静水体中分子的热扩散系数为 $0.014 \text{ cm}^2/\text{s}$ ，而紊动的扩散系数约为 $3.36 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。后者为前者的 236 倍，可见紊动扩散的作用是主要的。

在水体中还由于流速分布不均匀，会出现离散（有的称弥散）现象。只要考虑某种空间的平均（如流速对空间的平均、浓度对空间的平均），就会有离散问题。此外，水体是有边界的（如河流的岸边），污染物质的运动受到边界的限制，存在边界反射问题。

紊流、扩散、离散、边界反射等是水体污染的重要水力特性。其中扩散（diffusion）和离散（dispersion）是水体中污染物物质得以产生分散现象，从而出现混合的重要物理机制。

因此，本篇重点讨论并分析与水污染有关的水流动力学的基本原理和基本方程，紊流、扩散现象及其基本规律与基本方程，以及管流和明渠流的流速分布、阻力等有关内容。

第 1 章 水流动力学的基本概念和基本规律

因为天然河流、湖泊等自然水体对于污染物具有一定的输移、混合、稀释和净化作用，在城市污水和工业废水排入自然水体之后为探讨其在天然水体中的输移、混合、稀释和净化作用，必须对天然水体的水力学或流体力学的基本原理有一定的认识。这里仅对与天然河流和湖

泊的水污染有关的水力学基础做扼要分析和讨论，以作为本书后面讨论水污染动力学和水污染控制的基础之一。

1.1 液体的基本特征和主要物理性质

(1) 流动性 和固体相比，液体具有一定大小的体积，能充满任何容器，液体容易改变自己的形状，例如，把水倒入什么样形状的容器，它便具有什么样的形状；湖面的水可以被微风吹动；倒在地面上的水可以不断地流散开去；河流的水要自高处（上游）往低处（下游）流去。这种性质叫做流动性。

(2) 惯性及万有引力特性——质量、密度、重力、重率和相对密度 惯性就是物体所具有的反抗改变原有运动状态的性质。其量度为质量，质量越大惯性越大。

当物体受其他物体的作用力而改变运动状态时，此物体反抗改变原有运动状态而作用于其他物体上的力称惯性力，如该物体的质量为 m ，加速度为 a ，则惯性力

$$F = -ma \quad (1.1.1)$$

式中负号表示惯性的方向与物体加速度的方向相反。物体之间相互具有吸引力的性质，这个吸引力称为万有引力，其作用是企图改变物体原有运动状态而使其相互接近。重力是地心吸引力的表现，也是液体发生压力的根源。单位体积内的液体重力叫容重或重率，用 γ 表示。设体积为 V ，重力为 G ，则容重为

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ 或 } \gamma = \lim \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (1.1.2)$$

单位体积内液体的质量叫密度，用 ρ 表示。设体积为 V ，质量为 M ，则密度为

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ 或 } \rho = \lim \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1.1.3)$$

根据物理学的牛顿定律，重力 G 与质量 M 的关系为

$$G = Mg \quad (1.1.4)$$

式中， g 为重力加速度。用体积 V 除上式，并根据式(1.1.1)和式(1.1.2)得

$$r = \rho g \text{ 或 } \rho = \frac{r}{g} \quad (1.1.5)$$

由于液体体积随温度、压力的变化极小，对于同一种液体，在工程应用上容重可以认为是常数。例如水 $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$ 。蒸馏水的最大容重是在 4°C 时，其 $\gamma = 1 \text{ g/cm}^3$ 或 $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$ ，但因温度的变化而有变化，如：

-10°C	0°C	10°C	20°C	50°C
0.99815	0.99987	0.99973	0.99823	0.98807 (g/cm^3)

因为 $g = 981 \text{ cm/s}^2$ ，故

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (1.1.6)$$

所以密度随着温度的变化而变化。

见表 1.1.1，可见在热污染（热水）及工业废水污染问题上水的密度是很重要的。

另一个与此有关的名词叫相对密度，即单位体积水的质量取作 1 时单位体积的物质的质量，即或物质的密度与水的密度之比。例如，前面的水的单位质量与温度的关系也可理解为，当温度为 4°C 时，水的相对密度为 1，而当温度有变化时，其相对密度随温度而有变。

表 1.1.1 水的温度、密度及黏滞系数

温度/°C	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$100\nu(\text{运动黏滞系数})/(\text{cm}^2/\text{s})$	温度/°C	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$100\nu(\text{运动黏滞系数})/(\text{cm}^2/\text{s})$
0	0.9999	1.792	24	0.9973	0.914
1	0.9999	1.730	25	0.9970	0.894
2	1.0000	1.671	26	0.9968	0.875
3	1.0000	1.615	27	0.9966	0.856
4	1.0000	1.562	28	0.9963	0.837
5	1.0000	1.512	29	0.9960	0.819
6	1.0000	1.464	30	0.9957	0.801
7	0.9999	1.418	31	0.9954	0.785
8	0.9999	1.375	32	0.9951	0.770
9	0.9998	1.335	33	0.9947	0.753
10	0.9997	1.297	34	0.9944	0.738
11	0.9996	1.261	35	0.9940	0.724
12	0.9995	1.227	36	0.9937	0.710
13	0.9994	1.194	37	0.9933	0.697
14	0.9993	1.163	38	0.9930	0.683
15	0.9992	1.134	39	0.9926	0.670
16	0.9990	1.106	40	0.9922	0.658
17	0.9988	1.079	41	0.9918	0.647
18	0.9986	1.053	42	0.9915	0.635
19	0.9984	1.028	43	0.9911	0.625
20	0.9982	1.004	44	0.9907	0.615
21	0.9980	0.980	45	0.9902	0.604
22	0.9978	0.957	46	0.9898	0.593
23	0.9975	0.935			

(3) 黏滞性和黏滞系数 液体处于静止状态时,可以忽略液体抗拒变形的阻力,因而认为液体平衡时对于变形没有阻力,但是液体在流动以后,它就是有抗拒变形的阻力,不同的液体,其阻力也不同。例如,油和水相比,前者抗拒变形的能力大于后者,油的阻力大于水的阻力,这种能力或阻力,叫做黏滞性。实验和实践表明,用一根棒子分别搅动油和水时,搅动油要比搅动水费力一些,搅动就是使液体变形,搅动时之所以费力,是由于受到液体抗拒变形的阻力。

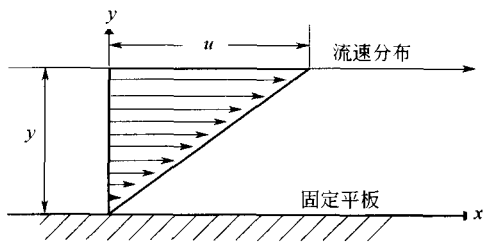


图 1.1.1

可以把运动液体视为由许多层依次叠加而成,如图 1.1.1 所示。

这许多层液体夹在两块平行的平板之间,下面的平板固定不动,而上面的平板以 u 的速度向右移动。邻近上平板的液体分子具有向右移动的速度 u ;而邻近下平板的液体分子的速度为零,中间各层液体分子的速度,则向上逐渐增加。它们的速度分布成一条直线,各层液体分子之间也产生反抗变形的阻力,这种阻力被理解为内摩擦力或切力。这和两个固体沿其接触面相对滑移而产生的摩擦力一样。所以把相邻液层之间由于相对运动而产生内摩擦力的性质叫做黏滞性。

设 A 是平板的面积, τ 是上面平板每单位面积所感受到的阻力,又叫做切力(或剪力); u 是上平板运动的速度; y 是两板之间的垂直距离; F 是使上平板向右移动所需的力。根据物理学的规律,内摩擦力与接触面的面积 A 及液层内的速度差 du (又叫相对速度)成正比,而与液层厚度 dy 则成反比,图 1.1.1 中,上下两层速度差是 u ,液层厚度是 y ,所以

$$F \propto A \frac{du}{dy} \propto A \frac{u}{y}$$

设比例常数为 μ 则

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1.1.7)$$

因为 $\tau = F/A$, 所以

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.1.8)$$

μ 为黏滞系数又称黏滞数, 其工程单位是 $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。常将 μ 与密度 ρ 之比, 用 ν 表达, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.1.9)$$

式中, ν 叫做运动黏滞系数, 又称动黏滞数。

从式(1.1.8), 可以看出, 当各层以同一速度运动时 (即 $du=0$) 或静止时 ($u=0$), $\frac{du}{dy}=0$, 则 $\tau=0$, 所以, 在静止液体中切应力等于零。

又如令 $\mu=0$, 则 τ 也等于零, 所以把 $\mu=0$, 即毫无黏滞性的液体称为理想液体。自然界实际存在的液体都具有或大或小的黏滞性, 所以叫做实际液体或黏滞性液体。为什么要提出理想液体, 是因为不考虑切力可使理论推导大为简化。再经修正后应用于实际液体。

水的密度与黏滞系数受温度的影响。通过精确的实验, 得到 ρ 及 ν 的数值, 可参见表 1.1.1, 表中的数字是根据最近发表的资料整理的, 可能和旧版本的书略有差异。

(4) 压缩性及体积压缩系数或弹性系数 物体在外力作用下产生变形, 在除去外力后, 能恢复原状、消除变形的性质, 称为弹性。由于流体只能承受压力, 抵抗体积压缩变形, 并在除去外力后能恢复原状, 因此这种性质就称为压缩性, 实际上也可称为弹性。弹性力就是流体受外力压缩变形时所产生的企图恢复原状的内力, 其作用就是抵抗压缩变形、产生内压力, 从而影响流体的运动状态, 液体的压缩性 (或弹性) 的大小一般是用体积压缩系数 β 表达, 即液体体积的相对压缩值 $\frac{dV}{V}$ 与液体压强增值 dp 之比

$$\frac{dV}{V}/dp = \beta \text{ 或 } \beta = \frac{d\rho/\rho}{dp} \quad (1.1.10)$$

在工程中往往用体积弹性系数来表达液体的压缩性。

$$K = \frac{1}{\beta} \quad (1.1.11)$$

式中, β 是体积压缩系数, β 愈大愈易压缩, m^2/N ; K 是 β 的倒数, 即弹性系数, K 愈大愈不易压缩, N/m^2 ; 当 $K=\infty$ 时即绝对不可压缩, 水的 K 值按国际单位制为 $2.10 \times 10^9 \text{N}/\text{m}^2$, 故可以认为水是不可压缩的。对于气体虽然温度和压强对于 β 和 K 值的影响较液体显著, 但一般在速度不高的流动情况下, 也可当做不可压缩的流体来处理。只有在压强变化过程非常迅速或者速度较高的运动现象中才必须考虑压缩性。

(5) 表面张力特性及表面张力系数 液体虽然不能承受张力, 但具有尽量缩小其表面的趋势, 故可以认为沿液体的表面作用着张力, 称其为表面张力。液体的表面张力一般产生在液体和气体相接触的自由表面上, 也可产生于液体与固体相接触的表面或与另一种液体相接触的表面。表面张力使液体表面拉紧收缩, 从而会对液流的运动状况有所影响。表面张力的大小可用液体表面上单位长度所受的张力即表面张力系数 σ 来表示, 其单位按国际单位制为 N/m (牛顿/米)。

1.2 作用于液体的力

液体无论处于运动或平衡状态, 都受到各种力的作用, 这些力按其物理性质的不同可以分

为惯性力、重力、黏滞力、弹性力和表面张力等。为便于分析液体的运动或平衡规律，又可将液体上的作用力按其表现形式分为质量力和表面力两种。

质量力作用于液体的每个质点上，并与受作用的液体的质量成比例。在均质液体中，质量力也必须与受作用的液体的体积成比例，所以又称为体积力。单位质量液体上所受的质量力称为单位质量力或单位体积力，其单位为 m/s^2 ，与加速度的单位相同。

设液体的质量为 m ，所受的质量力为 F ，其单位质量力为 $f = \frac{F}{m}$ ；令 F 在各个坐标轴上的分力为 F_x 、 F_y 、 F_z ，则单位质量力在各个坐标轴上的分力为 \bar{X} 、 \bar{Y} 、 \bar{Z} ，即

$$\bar{X} = \frac{F_x}{m}, \bar{Y} = \frac{F_y}{m}, \bar{Z} = \frac{F_z}{m} \quad (1.2.1)$$

表面力作用于液体的表面上，并与受作用的液体表面积成比例。表面力又可分为垂直作用面的压力和平行于作用面的切力，至于拉力一般在液体中都是忽略的。令液体的表面积为 A ，作用的压力为 P ，切力为 F ，则作用在单位面积上的平均压应力（又称平均压强） p 为 $\frac{P}{A}$ ，作用在单位面积上的平均切应力 τ 为 $\frac{F}{A}$ 。根据连续介质的假设，可以取其极限值，引入点应力的概念，则压应力和切应力分别为：

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1.2.2)$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1.2.3)$$

压应力（压强）和切应力的单位在国际单位制中均为 N/m^2 （牛顿/米²），即帕斯卡（Pa），简称帕。

1.3 静水力学的基本原理和规律

水力学可以分为静水力学和动水力学，对静止水体问题的研究称为静水力学，对运动水体问题的研究称动水力学，静水力学是研究液体在静止状态下的平衡规律及其应用，所谓静止是一个相对概念，如果液体相对地球没有运动。我们就说它是处于静止状态，即液体质点相对于参考坐标系没有运动而处于静止状态的液体，液体的相邻分子没有相对运动。因而黏滞性不发生作用。在这类问题中，只有压力存在，处于静止状态的液体质点之间，以及质点和边壁之间的作用，是通过压强的形式来表现的，静水力学的核心问题是根据平衡条件求解水中的压强分布，并根据压强分布规律进而确定各种情况下的静水总压力及其方向、大小和作用点。而动水力学是研究液体运动的情况；分子之间有相对运动，黏滞性起了很大作用，因此除了压力之外，还产生阻力。

1.3.1 静水压力及其特性和规律

因为在前面我们认为液体在静止时是没有摩擦力（即切应力），所以，根据材料力学原理，作用于一个小单元上的水压力 P 只垂直于它的作用面，而在平行于作用面上的切力等于零。如图 1.3.1 所示。

图 1.3.2 是一只水箱，在箱壁和箱底开两个孔，并且各有一个塞子，塞子后面有一只弹簧，再连着一个压力计，可以量出压力的大小。塞子承受水压力。必须在塞子上加一个压力才能保持平衡。保持平衡的压力就是静水压力。设孔的断面积为 A ，作用的总压力是 P ，因此单位面积压力为：

$$p = \frac{P}{A}$$