

HUANJING
LIUTI LIXUE

环境流体力学

周从直 杨 琴 龙向宇 编



重庆大学出版社

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

环境流体力学

周从直 杨 琴 龙向宇 编

重庆大学出版社

内容提要

本书系统介绍了环境流体力学的基本概念和基本理论。其主要内容包括:流体运动基本方程、紊流与紊流模型、流体中的迁移扩散、剪切流中的离散、射流与浮羽流、分层流、河流水质模型、湖泊水质模型和地下水水质模型等。文字叙述力求通俗易懂,数学推演力求详细严密,各章附有习题,一些章节附有例题或应用实例。

本书可作为环境工程专业和相关专业研究生、大学高年级学生的教材或参考书,也可供与环境有关专业领域的教学、科研与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境流体力学/周从直,杨琴,龙向宇编. —重庆:重庆大学出版社,2010.5

ISBN 978-7-5624-5369-7

I. ①环… II. ①周…②杨…③龙… 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(2010)第 064839 号

环境流体力学

周从直 杨 琴 龙向宇 编

策划编辑:曾显跃

责任编辑:李定群 版式设计:曾显跃

责任校对:贾 梅 责任印制:张 策

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

重庆升光电力印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:20.25 字数:505千

2010年5月第1版 2010年5月第1次印刷

ISBN 978-7-5624-5369-7 定价:40.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

环境流体力学是应用流体力学的基本原理和方法研究、解决环境问题的一门交叉性学科,是在流体力学、环境科学、环境工程、水利工程等学科相互融合、渗透的基础上发展起来的新兴学科。环境流体力学主要研究污染物在环境流体中的扩散、输移规律,是进行大气、水体环境质量评价、预测预报、环境规划、环境管理和水体污染修复的理论基础,因此是解决大气污染控制、水污染控制问题的有力工具。

本质上,大气污染、水污染是污染物进入环境流体、输移扩散、超过环境容量的结果,分析和最终解决这类污染问题需要清楚了解污染物的输移扩散机理、影响因素和动力学过程,正确确定污染物浓度的时空分布。环境流体力学就是为满足这些要求而产生的,它提供了精确分析污染物在天然水体,包括河流、湖泊、海洋、地下水和大气中混合过程的理论和方法。混合是一个十分复杂的过程,涉及分子扩散、紊动扩散和弥散。分子扩散的理论最早是费克(Fick, A.)奠定的,紊动扩散和弥散则起于泰勒(Taylor, G. I.)开创性的工作,他们的成果广泛用于河流、湖泊、海湾的水质分析。现今,环境流体力学的领域随着流体力学理论用于污染物在环境中迁移转化的研究而得到进一步扩展,如密度分层流的研究及其在大气与水环境问题分析中的应用;浮羽流、浮射流的研究及其在污水排放稀释工程设计中的应用等。

本书以污染物在环境流体中扩散、输移规律为主要内容,系统介绍环境流体力学的基本概念、基本理论和分析解决问题的基本方法。全书共分9章,首先简要回顾流体运动的基本概念和基本方程,接着讨论紊流的基本概念及随机变量的处理方法、常用的紊流模型。从第3章起,分章介绍分子扩散,紊流扩散,剪切流中的离散,紊动射流、浮羽流和浮射流,分层流,河流水质模型,湖泊水质模型,第9章介绍地下水水质模型。本书文字叙述力求通俗易懂,数学推演力求详细严密,各章附有习题,一些章节附有例题或应用实例,以帮助读者学习理解。

本书由周从直、杨琴和龙向宇编写。周从直负责组织和全文审核,并编写第2,4,5,6章,杨琴编写第3,7,8章,龙向宇编写第1,9章。本书在编写过程中引用和参阅了同行的许多研

究成果和论著,均在书后参考资料中列出,编者在此表示衷心感谢。编者还要感谢后勤工程学院训练部的同志们,他们的关心、支持和该部的资助才促成了本书的出版。

环境流体力学内容丰富,研究领域广泛,而且作为一门新兴学科正在迅速发展,本书仅反映了一些基础性的重要成果。由于编者水平有限,书中错误与疏漏在所难免,敬请读者批评指正。

编 者
2010 年 3 月

主要符号表

本表仅含通用的主要符号,局部使用符号在文中出现时说明。

英文字母符号:

A	断面面积;常数
A_1, A_2	分别为悬移质、推移质所占据的断面面积
AR	大气长波辐射量
AR_b	长波反射量
a	加速度
a_1, a_1	分别为单位重量悬移质、推移质对溶解态重金属的吸附量
a_3	单位面积底泥对重金属的吸附量
B	比浮力通量;水面宽度;水面宽度(河宽);底泥耗氧;细菌浓度;地下水越流因素
B_o	出口起始断面比浮力通量
BR	水体长波返回辐射量
b	射流主体段的半厚度;地下水含水层厚度
b_o	射流出口起始断面的半厚度
b_c	射流势流核心区的半厚度
b_m	射流混合区的厚度
b_e	流速 $u = \frac{u_m}{e}$ 处的射流半厚度
$b_{1/2}$	流速 $u = \frac{u_m}{2}$ 处的射流半厚度
b_1	推移质吸附系数
b_3	底泥吸附系数
C	各种系数;谢才系数;浓度
C_a	断面平均浓度

C_D	阻力系数
C_a	叶绿素 a 浓度
C_c	碳化阶段的 BOD 浓度
C_N	硝化阶段的 BOD 浓度
C_P	浮羽流不变量
C_R	底泥释放和地表径流引起的 BOD 变化
C_E	平衡浓度
c	浓度场的点浓度
c_m	射流轴线浓度
c_o	出口起始断面的浓度
c_p	定压比热; 浓度矩; 压力系数
c_v	定容比热
D	直径; 氧亏值; 地下水水动力弥散系数
D_C	临界氧亏值
D_B	藻类光合作用和呼吸作用引起的溶解氧变化
D_m	分子扩散系数
D_t	紊动扩散系数
$D_{\parallel}$	纵向紊动扩散系数
$D_{\perp}$	横向紊动扩散系数
D_w	垂向紊动扩散系数
D_L	纵向离散(弥散)系数
D_T	横向离散(弥散)系数
D'	地下水机械弥散系数
D_d	地下水有效分子扩散系数
d	粒径
E	总能量; 蒸发损失热量
Ek	埃克曼数
e	单位质量流体的内能
F	力; 函数符号
F_c	移流扩散方程的源汇项; 向心力
F_D	阻力
Fd	密度弗罗德数
Fd_o	出口起始断面的密度弗罗德数
Fr	弗罗德数
f	摩擦系数; 函数符号; 单位质量的质量力
f_b	壁面上摩擦系数
f_i	内界面摩擦系数

G	重力
$G(x)$	过滤函数
g	重力加速度
g^*	折减重力加速度
g_o^*	出口起始断面折减重力加速度
H	水深;水头
h	水深
h_1	二层流的上层水深
h_2	二层流的下层水深
h_c	临界水深
h_B	浮力主导的浮射流浮升终点高度
h_m	动量主导的浮射流浮升终点高度
I	积分值;紊流度
I_w, i	水面坡度
i_b	底坡
K	综合扩散系数,混合系数
K_x	纵向混合系数
K_y	横向混合系数
K_{11}	有机氮的降解系数
K_{22}	氨氮的降解系数
K_{33}	亚硝酸氮的降解系数
K_{44}	硝酸氮的降解系数
K_{12}	有机氮转化为氨氮的转化系数
K_{23}	氨氮转化为亚硝酸氮的转化系数
K_{34}	亚硝酸氮转化为硝酸氮的转化系数
K_{OP1}	正磷酸盐沉降率
K_{OP2}	叶绿素 a 对正磷酸盐的吸收率
K_p	水生植物呼吸耗氧速率系数
K_s	底泥耗氧速率系数
K_a	大气复氧速率系数
k	单位质量流体的紊动动能;水体生物及非生物因素耗氧总量,渗透系数
k_1	污染物降解速率常数;悬移质吸附系数
k_2	水体复氧系数;悬移质解吸系数
k_{1c}	碳化耗氧量(CBOD)的衰减速率常数
k_{1N}	硝化耗氧量(NBOD)的衰减速率常数
k_p	磷的沉降率
$k_{a,T}$	水温 $T(^{\circ}\text{C})$ 时的大气复氧速率系数

K_{1C}	碳化阶段的 BOD 衰减速率
K_{1N}	硝化阶段的 BOD 衰减速率
L	长度;特征长度;距离;湖水的生化需氧量;湖泊面积负荷磷浓度;力矩
L_1, L_2	水库表层和底层的 BOD 浓度
L_o	射流起始段长度
L_s	底泥 BOD 面积负荷
l	普朗特动量传递理论的混合长度
l_Q	反映动量射流的特征长度
l_m	反映起始浮力和起始动量的特征长度
M	动量通量;扩散质的总质量
M_o	起始动量通量
m	比动量通量
m_o	起始比动量通量
N_1	有机氮浓度
N_2	氨氮浓度
N_3	亚硝酸氮浓度
N_4	硝酸氮浓度
n	壁面粗糙度;孔隙率
O	原点;溶解氧浓度
O_0	体系内的溶解氧浓度
O_p	排污口排放污水中溶解氧浓度
O_s	饱和溶解氧浓度
OP	正磷酸盐浓度
P	表面力;压力;应力张量;概率;湖泊中的总磷浓度
p	压强;概算密度函数
P_e	佩克立数
p_o	产氧速率
P_0, P_t	分别为湖泊起始时刻和经过 t 时间后水中的磷浓度
Q	体积流量(比质量通量);扩散质通量
Q_o	出口断面起始流量
Q_e	卷吸流量
q	单宽流量;通过单位面积的溶质通量
q^2	三个脉动流速分量的平方和
R	射流出口流速与横流流速之比;水力半径;气体常数
Re	雷诺数
R_i	理查森数
R_p	浮羽流的理查森数

R_{y1}, R'_{y1}	地面径流进、出湖泊带入、带走的盐量
R_{y2}, R'_{y2}	地下径流进、出湖泊带入、带走的盐量
R_x	江水带入湖泊的盐量
R_g, R'_g	工农业排水与用水带入、带出湖泊的盐量
R_L	磷理论滞留系数
r	半径; 径距; 径向坐标
S	变形率张量; 平均稀释度; 源、汇项
S_m	轴线上稀释度
SR	太阳短波辐射量
SR_b	短波反射量
s	曲线坐标; 曲线段长度; 熵; 细菌的死亡速率
T	温度; 周期; 导水系数
t	时间
t_c	临界氧亏出现的时间
U	均匀流的纵向流速
$u_i (i=1, 2, 3)$	直角坐标系中的流速分量, 依次为纵向、横向及铅垂向
u, v, w	
u_o, w_o	射流出口断面起始流速
u_a	横流流速
u_i	二层流的界面流速
u_*	摩阻流速
u_m, w_m	断面上最大流速; 射流轴线流速
u_r, u_θ	柱坐标系中径向、切向流速
V	速度, 断面平均流速
V_z	垂向平均流速
V_∞	无穷远处来流流速
V_1	二层流的上层流速
V_2	二层流的下层流速
v_e	卷吸流速
W	功, 宽度
$x_i (i=1, 2, 3)$	直角坐标系的 3 个正交坐标, 一般依次为纵向、横向及铅垂向
x, y, z	
Y_o	总耗氧量
Y_c	碳化耗氧量 (CBOD) 和
Y_n	硝化耗氧量 (NBOD) 耗氧量
Y_p	水生植物耗氧量

Y_s	底泥耗氧量
z_m	综合反映浮射流起始动量与横流流速的特征尺度
z_B	综合反映浮射流起始动浮力与横流流速的特征尺度
希腊字母符号:	
α	流体微团邻边夹角;热扩散系数(导温系数);卷吸系数
β	体积膨胀系数
γ	容重;比热之比(c_p/c_v)
Γ	速度环量
δ	边界层厚度
δ_{ij}	张量算符
ε	单位质量流体脉动能量耗损率,射流的扩展系数;折减系数($\frac{\Delta p}{\rho}$)
ζ	坐标;浮射流的一个无量纲高度
η	坐标;无量纲变量
θ	角度
κ	紊流的卡门常数
λ	波长;热传导系数;浓度分布剖面与速度分布剖面的宽度比
μ	黏滞系数
$\bar{\mu}$	射流无量纲流量比;稀释度
ν	运动黏滞系数
ν_t	紊动黏性系数(涡黏性系数)
ξ	均匀流的随流坐标
ρ	密度
ρ_1	二层流的上层密度
ρ_2	二层流的下层密度
ρ_a	射流周围环境密度
ρ_o	射流出口断面起始密度
ρ_m	断面最大密度;射流轴线密度
∇	哈密尔顿算子 $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$
∇^2	拉普拉斯算子
Σ	应力张量
σ	标准差,常数
σ^2	方差
σ_k	紊流 k 方程中系数
σ_ε	紊流 ε 方程中系数
τ	时间;剪切应力;体积

τ_0	壁面剪切应力
Φ	耗散函数
φ	流速势
ψ	流函数;细菌生长速率
ω	角转速
$\Omega_i (i=1,2,3)$	涡量(旋度)

附加符号:

顶标“—”	表示系综平均值;时间平均值
顶标“'”	表示脉动值
顶标“^”	表示偏离值(时均值与断面平均值之差)
$\langle \dots \rangle$	表示断面平均值

目 录

第 1 章 流体运动基本方程	1
1.1 流体的连续性假设、质点与微团	1
1.1.1 流体微团与质点的特征及概念	1
1.1.2 流体的连续性假设	2
1.2 描述流体运动的两种方法	3
1.2.1 拉格朗日法	3
1.2.2 欧拉法	4
1.2.3 拉格朗日法与欧拉法的相互转换	5
1.3 质点导数	6
1.4 作用在流体上的力	8
1.4.1 质量力	8
1.4.2 表面力	8
1.4.3 应力及其性质	9
1.4.4 应力张量及其性质	9
1.5 流体微团的运动与形变	12
1.5.1 线形变	12
1.5.2 旋转	13
1.5.3 角变形	15
1.5.4 变形率张量	15
1.6 流体本构方程	16
1.7 连续性方程	17
1.7.1 拉格朗日型连续性方程	17
1.7.2 欧拉型连续性方程	18
1.8 运动方程	19
1.8.1 动量方程	19
1.8.2 纳维-斯托克斯方程	20
1.9 能量方程	21
1.9.1 能量方程的一般形式	21

1.9.2 内能方程	22
1.10 有势流动与有涡流动	23
1.10.1 有势流动与拉普拉斯方程	23
1.10.2 有涡运动与涡量方程	24
1.11 边界层	25
1.11.1 边界层的概念	25
1.11.2 边界层动量积分方程	27
1.12 布辛涅斯克近似	29
习题	29
第2章 紊流与紊流模型	33
2.1 流动的黏性效应	33
2.1.1 圆柱绕流	33
2.1.2 管内流动	35
2.2 层流与紊流	37
2.2.1 流态与转捩	37
2.2.2 层流稳定性	38
2.2.3 紊流的发生过程	40
2.2.4 充分发展紊流的特征	43
2.3 统计平均法	44
2.3.1 随机函数	45
2.3.2 时均法	45
2.3.3 体均法	46
2.3.4 概率平均法	46
2.3.5 各态遍历假说	47
2.3.6 随机量的运算法则	48
2.4 紊流的基本方程	49
2.4.1 紊流的连续性方程	50
2.4.2 紊流的运动方程	50
2.4.3 紊流的能量方程	52
2.5 紊流模型	56
2.5.1 零方程模型	57
2.5.2 一方程模型—— k 方程模型	59
2.5.3 二方程模型—— $k-\varepsilon$ 方程模型	61
2.5.4 其他模型简介	62
习题	64

第3章 流体中的迁移扩散	65
3.1 分子扩散的费克定律与扩散方程	65
3.1.1 费克第一定律	65
3.1.2 费克第二定律(分子扩散方程)	66
3.2 静止流体中的扩散	67
3.2.1 瞬时点源	68
3.2.2 瞬时分布源	71
3.2.3 时间连续源	73
3.2.4 有边界反射情况下的瞬时点源	74
3.3 移流扩散方程	76
3.3.1 移流扩散方程	76
3.3.2 移流扩散方程的解	76
3.4 分子扩散的随机游动分析	78
3.5 紊动扩散的拉格朗日法	80
3.6 紊动扩散的欧拉法	82
3.6.1 紊动扩散方程	82
3.6.2 雷诺比拟	83
3.6.3 若干定解条件下紊动扩散方程的解	84
习题	85
第4章 剪切流中的离散	87
4.1 一维纵向移流离散方程	87
4.1.1 断面平均值	88
4.1.2 纵向移流离散方程	88
4.2 圆管中的离散	90
4.2.1 圆管层流中的离散	90
4.2.2 圆管紊流中的离散	94
4.3 宽矩形断面明渠流中的离散	98
4.3.1 层流纵向离散	98
4.3.2 紊流纵向离散	100
4.4 非定常剪切流中的离散	103
4.4.1 定常流	104
4.4.2 非定常往复流	105
4.4.3 非定常流	106
4.5 二维流中的离散	108
4.6 天然河流中的离散	111
4.6.1 河流混合的几个阶段	111

4.6.2	河流的紊动扩散系数	113
4.6.3	河流纵向离散系数	114
4.7	河流污染带计算	121
4.7.1	污染带浓度分布	121
4.7.2	污染带长度	122
4.7.3	污染带宽度	123
	习题	123
第5章	射流与浮羽流	125
5.1	射流概述	126
5.1.1	射流类型	126
5.1.2	紊动射流的形成与结构	126
5.1.3	紊动射流的特征	128
5.1.4	射流的研究内容和分析途径	130
5.2	等密度自由紊动射流	130
5.2.1	平面自由紊动淹没射流的动量积分解	131
5.2.2	平面自由紊动淹没射流的微分方程解	135
5.2.3	圆断面自由紊动淹没射流的动量积分解	137
5.2.4	圆断面自由紊动淹没射流的微分方程解	140
5.2.5	矩形断面喷口的自由紊动射流	144
5.3	浮力羽流	150
5.3.1	浮羽流的基本方程解	150
5.3.2	浮羽流的量纲分析解	157
5.4	浮射流	159
5.4.1	自由紊动浮射流的数值解	160
5.4.2	自由紊动浮射流的量纲分析解	172
5.5	横流中的紊动射流	178
5.5.1	垂立向上射入横流中的等密度圆断面紊动射流	178
5.5.2	垂立向上射入横流中的浮射流	182
	习题	184
第6章	分层流	186
6.1	静止流体的分层与稳定	186
6.1.1	湖泊、水库和海洋中水体的分层	186
6.1.2	大气的分层与平衡	188
6.1.3	分层流体平衡的稳定	190

6.2 明渠中的二层均匀异重流	191
6.2.1 下层均匀流	192
6.2.2 下层层流	193
6.2.3 下层紊流	195
6.3 二层定常非均匀异重流	195
6.3.1 渐变流基本方程	195
6.3.2 盐水楔	198
6.3.3 内水跃	200
6.4 分层取水	201
6.4.1 堵塞现象	201
6.4.2 在二层水域中侧向抽取下层水	202
6.4.3 在二层水域中侧向抽取上层水	204
6.4.4 挡墙下层取水	206
6.4.5 下层水平管取水	207
6.4.6 其他选择取水	207
6.5 密度分层流的计算实例	208
6.5.1 教学模型	209
6.5.2 参数计算	209
6.5.3 数值方法	212
6.5.4 模型验证	213
6.5.5 模型应用	213
习题	215
第7章 河流水质模型	216
7.1 水质模型分类	216
7.1.1 零维模型	217
7.1.2 一维模型	218
7.1.3 二维模型	219
7.1.4 三维模型	222
7.2 水体耗氧、复氧机理与溶解氧水质模型	223
7.2.1 水体耗氧、复氧机理	223
7.2.2 BOD-DO 模型	225
7.2.3 溶解氧水质方程参数估算	227
7.3 河流综合水质模型	229
7.3.1 QUAL 模型	229
7.3.2 WASP 模型	230
7.3.3 CE-QUAL-W2 模型	231