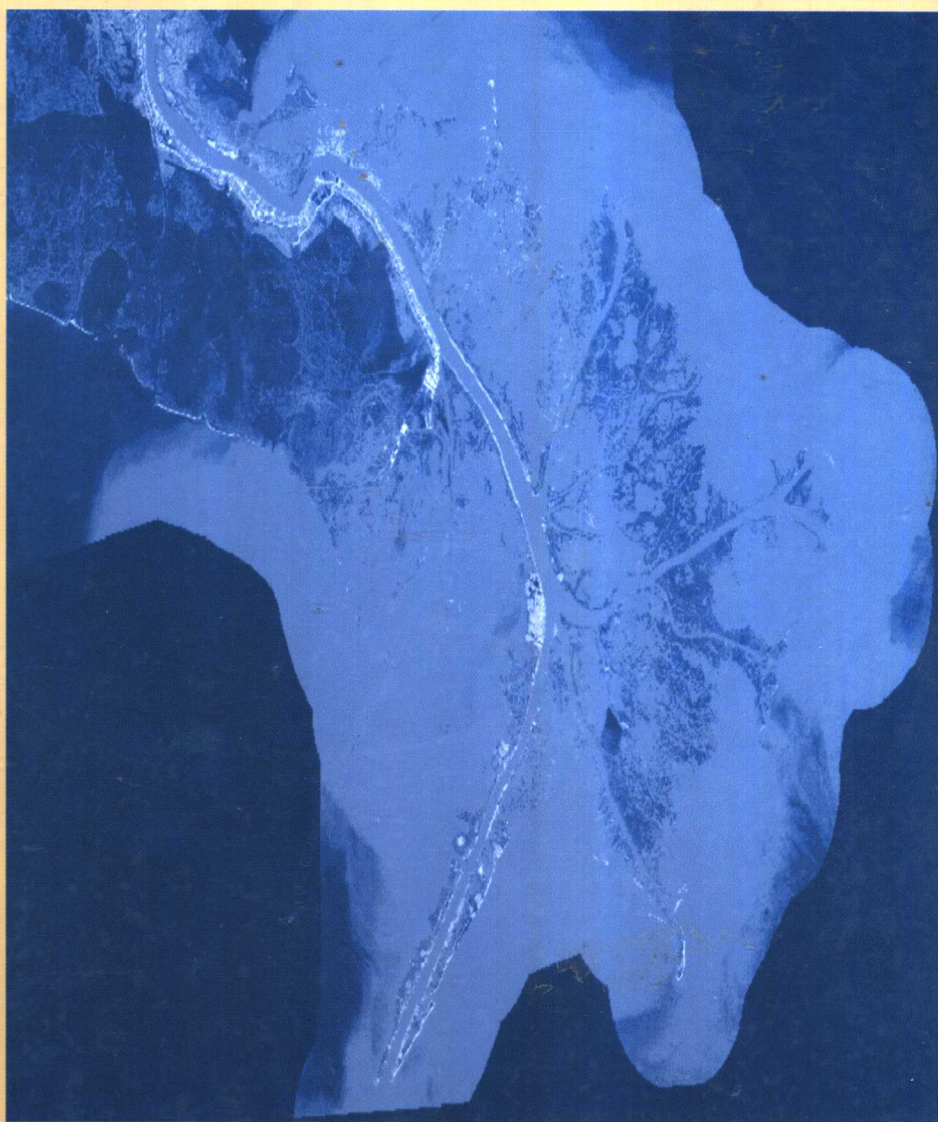
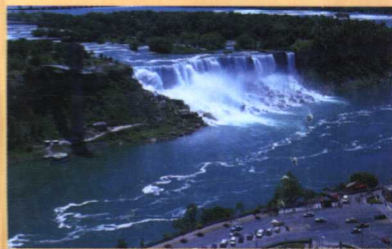
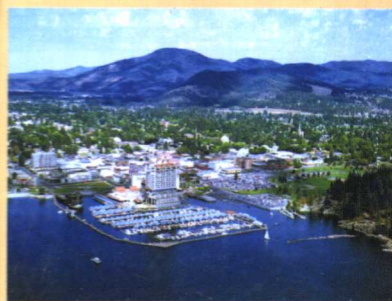


河口海岸工程导论

王御华 恽才兴 著

HEKOU HAIAN GONGCHENG DAOLUN



海洋出版社

河口海岸工程导论

王御华 恽才兴 著

海洋出版社

2004年·北京

图书在版编目(CIP)数据

河口海岸工程导论 / 王御华, 恽才兴著. — 北京: 海洋出版社, 2004. 1
ISBN 7-5027-6029-6

I. 河… II. ①王… ②恽… III. ①河口—水利工程 ②海岸工程
IV. ①TV856 ②P753

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 119396 号

责任编辑: 阎 安

责任印制: 严国晋

海洋出版社 出版发行

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

(100081 北京市海淀区大慧寺路 8 号)

北京兰空印刷厂印刷 各地新华书店经销

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 15

字数: 360 千字 印数: 1~1000 册

定价: 78.00 元

海洋版图书印、装错误可随时退换

作者简介

王御华 美籍河口海岸工程专家、注册职业工程师、美国土木工程学会会员,美国地球物理联盟、国际水动力研究、海洋技术学会、海底钻探技术协会会员,以及中国青岛海岸工程学会荣誉理事,在美国南加利福尼亚大学获博士学位。1972年9月至1979年11月在佛罗里达州 Gainesville 大学海岸与海洋工程系任教,1980—2000年任美国得克萨斯州加尔维斯敦大学 A&M 学院海洋工程系教授,曾任系主任多年,并新编设一系列课程。

王御华博士作为河口海岸工程项目主要负责人,向得克萨斯州州议会参议院及众议院提出创建得克萨斯州海岸带研究中心(CTBS)计划,经参众两院投票通过,州长签署,经立法 CTBS 于 1991 年 6 月正式成立。作为 CTBS 创建人,王御华博士被聘任为得克萨斯州 A&M 大学加尔维斯敦校区 CTBS 第一任中心主任。

王御华博士从事河口海岸工程研究 30 余年,在任得克萨斯州 A&M 加尔维斯敦大学海洋工程系主任期间,作为主要负责人开展了多项河口海岸工程项目研究。发表了 50 余篇河口海岸工程方面的学术论文。

王御华博士自 1979 年以来,多次作为访问学者到中国,他的足迹遍布中国许多城市的大学和研究所。1993—1997 年,他曾经作为美国专家,代表美国与欧洲同行一起参加了联合国项目:黄河三角洲可持续发展研究。

恽才兴 华东师范大学河口海岸研究所教授,中国海洋遥感学会副理事长、中国地理学会海洋地理专业委员会副主任、上海市海洋与湖沼学会副理事长等多个学术团体理事。

1957 年毕业于华东师范大学地理系本科,1980 年 11 月至 1986 年 4 月任该校副教授,1986 年 5 月以来任教授,1993 年 11 月由国家批准为第 5 批新增博士生导师,1989—1996 年任河口海岸国家重点实验室第一任主任,2003 年 1 月被聘为华东师范大学终身教授。

恽才兴教授于 1974 年 7 月至 1976 年 6 月,作为上海市首批援藏教师队赴拉萨参加西藏师范大学(现为西藏大学)的筹建工作。1986 年及 1988 年曾率领中国专家组先后赴斯里兰卡和马尔代夫承担联合国亚太经社会地区(ESCAP)海洋遥感国际合作项目。自 1981 年以来,曾出访多个国家和地区,参加多次国际学术会议。

恽才兴教授 1957 年 9 月至今,从事河口海岸研究近半个世纪,对中国主要河口及海岸地区开展了综合调查研究,承担多项国家科技攻关项目和河口海岸工程研究任务,出版专著和专集 6 部,发表和撰写论文及科研成果报告 125 篇,获国家、部委、省市科技进步奖 11 项。

序

河口海岸动力、沉积、地貌过程是一门应用性较强的学科领域。其研究的科学内涵为海陆交互作用下,自然环境的演化和岸滩与海床的稳定性,它的主体应用背景为沿岸工程及近岸工程的合理布置。因此,随着海岸带开发利用的不断深入,一些沿岸工程动力学问题、沿岸工程泥沙问题、沿岸工程地貌问题就成为学术界和工程界共同关注的热点。本专著的撰写和出版,虽然其初衷是为研究生提供一本河口海岸综合研究和治理的基础性教材,实质上是想通过《河口海岸工程导论》教学过程,探索自然地理学与海岸工程学科交叉的结合点。

河口海岸地区自然环境非常复杂,作为专业研究生的一本入门书,如果一开始就把一些复杂问题全部展现出来,而且要求一一求解,就有可能将本来有趣的科学问题误导进入莫测高深的境界。为此,作者在写作过程中,本着出版一本能引起读者兴趣,又是专业性很强的教科书,在技术上通过简单的方程、图表、室内试验的成果曲线及工程实践范例等方法,对读者使河口海岸地区的复杂问题转化成为简单明了的物理概念,并进而引导他们掌握处理复杂问题的技术与方法,达到由浅入深的效果。

作者王御华博士和恽才兴教授是专业背景相近的同行。两人自1979年相识以来,通过多次互访和合作交流,共同感到河口海岸是一门具有生生不息的边缘学科,其理论性和实践性两方面都很强。在新世纪到来的时刻,如何将这门学科引向深入,如何培养新一代从事这方面研究的学者和专家,我们期望通过这本“导论”的出版,能进一步推动中美双方在河口海岸工程实践方面的系统总结和新一轮的学科建设。

中国工程院院士

陈余

2003年5月

前 言

王御华教授受华东师范大学王建磐校长邀请,2001年2—6月来我校河口海岸国家重点实验室为研究生讲授河口海岸工程导论。在此期间,中国工程院院士陈吉余教授曾经建议王博士将讲课教材整理为专著用中文出版,并委托恽才兴教授补充典型分汊河口治理经验及中国淤泥质海岸建港中的“浅水深用”成功实例,配合王博士完成《河口海岸工程导论》专著,以供海内外从事河口海岸的科学工作者及相关专业的研究生学习参考和借鉴。

本著作编写的首要目的在于为相关专业的硕士研究生提供一本对河口和海岸过程基本原理学习有兴趣的教科书,以便为学生进一步研究河口海岸水动力学和线性波理论以及工程实践方面提供一些背景知识。

本书共21章,两大部分,分别阐述河口与海岸工程的基本原理。第一部分包括第1章至第11章,系统阐述了河口工程基本原理,主要揭示河口各种自然现象的变化和整治工程的复杂性,如:(1)河口混合和扩散,以及与污染有关的控制;(2)河口水体作为一个与分层介质有关的盐水入侵现象;(3)河口环流和混合过程作用下的锋面波动;(4)河口泥沙运动与沉积作用,以及河口疏浚工程实践;(5)世界典型分汊河口整治经验。第二部分包括第12章至第20章,详尽阐述海岸工程基础,目的在于向读者提供沿岸工程基本理论及设计实践的宏观指导,其中用较多篇幅论述了海岸侵蚀防护、海岸与滩涂稳定性、海岸结构与海岸地貌分析等。最后,以中国淤泥质海岸建港中的“浅水深用”成功实例,介绍堆积海岸细颗粒泥沙运动特性和港口航道回淤量计算方法。需要说明的是:由于本书是以作者多年实际科研工作成果为基础编写成的,因此书中按原始资料保留了部分英制等非法定单位。

本书出版过程中得到上海市重点学科建设项目资助。在第11章《典型分汊河口整治经验》及第20章《中国淤泥质海岸建港“浅水深用”工程实例》编写过程中得到长江口航道建设有限公司金镠教授、南京水利科学研究院罗肇森教授和交通部天津水运科学研究所曹祖德教授等的大力支持。王御华教授在授课过程中,韩震副教授和巩彩兰博士承担了教学辅导工作和英文稿的大部分翻译工作,对本书中文版的出版起了重要作用。在此,作者对上述给予支持的同人一并致以诚挚的谢意。

作 者

2003年5月

目 次

第一篇 河口学基础

第 1 章 扩散过程	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 湍流对流扩散方程	(1)
1.3 恒定密度流的一维湍流扩散	(3)
1.4 非均值流的一维湍流扩散方程	(8)
第 2 章 湍流射流动力学	(12)
2.1 引言	(12)
2.2 观测:由图 2-1 说明自由湍流	(12)
2.3 平面射流动力学	(12)
2.4 轴向对称射流	(16)
第 3 章 层流基本认识	(18)
3.1 概述	(18)
3.2 密度变化的惯性影响	(19)
3.3 密度差异造成的重力影响	(20)
3.4 非均质流体产生涡动	(22)
第 4 章 河口潮汐动力学	(23)
4.1 强潮河口的一般特征	(23)
4.2 理想水道的一维潮流	(23)
4.3 河口潮汐动力学	(25)
第 5 章 近岸浅水区扩散	(27)
5.1 定义及目标	(27)
5.2 潮汐及潮流	(27)
5.3 垂向速度分布	(27)
5.4 余流	(28)
5.5 垂向混合	(28)
5.6 扩散	(29)
5.7 浅水的平流扩散方程	(31)
5.8 滞留时间	(32)

第 6 章 部分混合河口动力学 (34)

6.1 引言 (34)

6.2 概述 (34)

6.3 理论处理 (35)

6.4 与实际观测资料对比 (38)

6.5 小结 (43)

第 7 章 盐水入侵水动力学 (44)

7.1 概述 (44)

7.2 高度分层系统 (44)

7.3 混合河口的一维分析 (51)

第 8 章 河口锋 (56)

8.1 概述 (56)

8.2 羽状锋面 (56)

8.3 潮汐混合锋面 (63)

8.4 岬角锋面和岛屿锋面 (68)

8.5 河口锋的横向结构 (75)

8.6 结论 (83)

第 9 章 河口泥沙及河口沉积作用 (84)

9.1 概述 (84)

9.2 河口沉积特征 (84)

9.3 河口沉积作用 (87)

第 10 章 河口疏浚及其结果 (90)

10.1 问题的提出 (90)

10.2 潮流影响及实例 (90)

10.3 河口环流影响 (93)

10.4 结论 (96)

第 11 章 典型分汊河口治理经验 (97)

11.1 莱茵河口治理 (97)

11.2 密西西比河口治理 (102)

11.3 长江口深水航道治理 (106)

11.4 主要经验和问题 (111)

第二篇 海岸工程基本原理

第 12 章 沿海环境:物质组成、波浪和近岸流系 (115)

12.1 简介 (115)

12.2	沿海的物质组成	(115)
12.3	沿海波浪情况	(118)
12.4	近岸流	(119)
第 13 章	海岸线水位线变化	(122)
13.1	总论	(122)
13.2	潮滩上的波浪增水和减水	(122)
13.3	波浪爬高	(124)
13.4	飓风波浪	(124)
13.5	风暴潮	(127)
第 14 章	海岸带沙丘线:它的维护和修复	(134)
14.1	沙丘的功能	(134)
14.2	长周期影响	(134)
14.3	沙丘海岸线的维护和复原	(134)
14.4	自助沙丘修复(NADR)——一种费用合理的海滩建设和维护方法	(134)
第 15 章	沿岸漂沙	(138)
15.1	简介	(138)
15.2	后海滨和前海滨的沉积物搬运	(138)
15.3	海滩侵蚀和恢复	(141)
15.4	海滩侵蚀和淤积对比的预测	(142)
15.5	沿岸搬运	(143)
15.6	沉积物估算	(146)
第 16 章	海岸潮汐通道	(156)
16.1	简介	(156)
16.2	潮汐通道的地形	(156)
16.3	环流模式和潮汐通道的海流	(157)
16.4	O'Brien 的潮汐通道最小断面面积公式	(161)
16.5	潮汐通道水力学	(162)
16.6	潮汐通道的迁移和临近海岸线稳定性影响	(164)
16.7	潮汐通道沿岸物质的捕获	(165)
第 17 章	海岸建筑物的规划和设计分析	(167)
17.1	概论	(167)
17.2	岸墙、海堤和护坡	(168)
17.3	泥沙输移通道	(170)
17.4	沙丘	(171)
17.5	丁坝	(171)
17.6	突堤	(176)

17.7	和海岸连接的防波堤	(177)
17.8	离岸式防波堤	(178)
17.9	人工鱼礁和人工岛	(181)
17.10	设计海岸建筑物的一个新概念	(183)
第 18 章	块石建筑物的稳定性	(188)
18.1	概论	(188)
18.2	设计因素	(188)
18.3	覆盖层设计中的水力因素	(188)
18.4	稳定系数的选择	(191)
18.5	护面单体	(192)
18.6	建筑物横断面设计	(192)
18.7	块石基底的稳定性和坡脚保护	(197)
第 19 章	海岸线防护和海滩侵蚀控制	(202)
19.1	目前趋势和实际情况	(202)
19.2	填沙护滩	(202)
19.3	人造沙丘线	(206)
第 20 章	中国淤泥质海岸“浅水深用”工程实例	(207)
20.1	中国沿海港口建设概况	(207)
20.2	天津港发展与泥沙回淤研究	(207)
20.3	连云港深水泊位与深水航道扩建	(210)
20.4	黄骅港港口选址与建港模式	(216)
20.5	锦州港回淤研究	(220)
参考资料与书目		(223)
参考文献		(224)

第一篇 河口学基础

根据 Pritchard 的定义:河口是一个半封闭的沿岸水体,它与外海直接相连,在这里海水被来自陆地的径流冲淡。

在称为“河口”的地区,咸水、淡水相遇,源于口门并向内传播的潮汐运动至河口地区,导致河口环境中物质与能量的混合和扩散,因此,河口水体呈现“分层结构”。

河口地区存在的基本问题:①盐水入侵;②污水排放产生的污染;③沉积过程;④与层状流的扩散运动密切相关的泥沙运动。通常,在三个坐标方向均存在盐度梯度及相应的密度梯度,但是三维物质扩散方程的复杂性限制了它在河口地区潮流分析中的应用,因此,最常用的工具是用一维方程来近似分析盐水入侵、水污染以及泥沙运动等问题。

我们的基本目标是提供一本讲授对河口初步认识的教材,由于篇幅有限,河口有关问题要在有限的 11 个章节中介绍较为困难,因此,本书的重点放在分析方法、简单的模型以及理想化的河口等方面。虽然在这里不详细介绍复杂条件下的数学计算过程和详细的实验数据及其结果,然而本书介绍的基本原理对于理解在现场遇到的更为复杂情况将会大有帮助。

第 1 章 扩散过程

1.1 引言

河口学涉及的基本问题可以归结为以下四类:废弃物处理及其运移、盐水入侵、沉积过程以及泥沙输移,所有这些问题都与密度分层流环境下的扩散过程密切相关。本章旨在提供恒定或非恒定、均匀或层状流系统下,研究扩散现象的基本知识。

河口水体在三个坐标方向均存在密度梯度。但是三维物质扩散方程的复杂性限制了它在河口地区潮流分析中的应用,因此,本章介绍的一维近似方程是分析河口地区的盐水入侵、水污染以及泥沙运动等问题的最常用的框架。

1.2 湍流对流扩散方程

相对于宏观的湍流混合,其微观的分子运动可以忽略不计,在 x 方向进入研究单元的物质通量为 $(\rho c u) dy dz$ 。这里

$u = x$ 向的瞬时流速

$\rho = \text{密度} = \frac{\text{溶液质量}}{\text{溶液体积}}$

$c = \text{扩散物的瞬时浓度} = \frac{\text{溶质质量}}{\text{溶液质量}}$

$\rho c = \frac{\text{溶液质量}}{\text{溶液体积}} \times \frac{\text{溶质质量}}{\text{溶液质量}} = \frac{\text{溶质质量}}{\text{溶液体积}}$

通过流体单元的物质通量如图 1-1 所示。

在 x 向, 从单位体积出去的物质通量为 $\left[\rho c u + \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u) dx \right] dy dz$ 。

x 向的流动引起单元体内质量的净变化(输入减去输出)为 $\frac{\partial}{\partial x}(\rho c u) dx dy dz$ 。

单元体内 y 方向和 z 方向的质量净变化分别为 $\frac{\partial}{\partial y}(\rho c v) dx dy dz$; $\frac{\partial}{\partial z}(\rho c w) dx dy dz$ 。

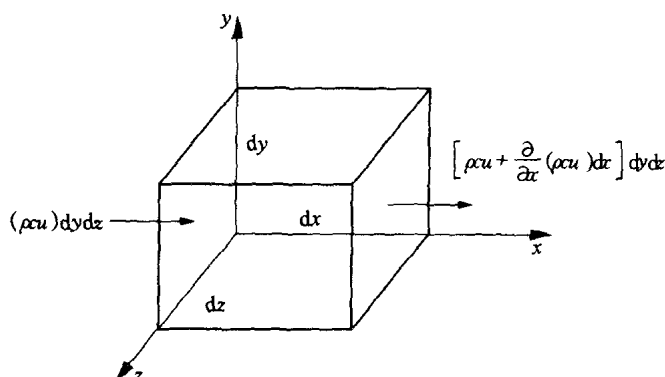


图 1-1 通过流体单元的物质通量示意图

在 x, y, z 三个方向上总的变化必然等于单位体积($dx dy dz$)内物质质量随时间 t 的变化, 然后除以单元体的体积之后得

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho c v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho c w) = 0$$

式中: u, v, w 分别为 x, y, z 各向的瞬时流速; t 为时间。

应用该方程, 如果总的密度(ρ)变化随溶解物质的变化最大为 2%, 那么, 相对于浓度梯度 ∇c 而言, 密度梯度 $\nabla \rho$ 相当小。在自然条件下, 确实如此。

当 $\nabla \rho$ 远小于 ∇c , 可以将上面的方程近似表示为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(cu) + \frac{\partial}{\partial y}(cv) + \frac{\partial}{\partial z}(cw) = 0 \quad (1-1a)$$

对于湍流场, 瞬时流速与浓度可以表达为关于时间的平均值及波动值之和:

$$u = \bar{u} + u'; v = \bar{v} + v'; w = \bar{w} + w'; c = \bar{c} + c'$$

带入公式(1-1a), 得到

$$\frac{\partial(\bar{c} + c')}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(\bar{c} + c')(\bar{u} + u')] + \frac{\partial}{\partial y}[(\bar{c} + c')(\bar{v} + v')] + \frac{\partial}{\partial z}[(\bar{c} + c')(\bar{w} + w')] = 0$$

取时间平均, 则 $\bar{u}', \bar{v}', \bar{w}'; \overline{u'u'}, \overline{v'v'}, \overline{w'w'}$ 均为 0, 上述方程可简化为

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \left[\frac{\partial \bar{u}\bar{c}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'c'}}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial \bar{v}\bar{c}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'c'}}{\partial y} \right] + \left[\frac{\partial \bar{w}\bar{c}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} \right] = 0 \quad (1-1b)$$

利用湍流连续方程,即

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

方程式(1-1b)进一步简化为

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{u'c'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'c'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} = 0 \quad (1-2a)$$

交叉乘积项如 $\overline{u'c'}$ 必然表示整个场的平均状况。为此,引用菲克斯扩散法则:质量通量($u'c'$)正比于平均浓度梯度,其方向为浓度增长的方向。因此

$$\overline{u'c'} = -D_{tx} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}; \overline{v'c'} = -D_{ty} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y}; \overline{w'c'} = -D_{tz} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \quad (1-2b)$$

式中: D_{tx}, D_{ty} 为水平湍流扩散系数; D_{tz} 为垂向湍流扩散系数。

式(1-2b)代入式(1-2a),得到三维对流扩散方程如下:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{tx} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ty} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{tz} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) \quad (1-3)$$

式中,等号左方为随流速变化的物质对流输移;等号右方为非平流紊动质量输移。

1.3 恒定密度流的一维湍流扩散

1.3.1 一维湍流扩散方程及其解

假设只考虑 $c = f(x, t)$ 以及 $v=0, w=0, u=U$ 的情况,式(1-3)的三维扩散方程简化为一维方程:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{tx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (1-4)$$

方程(1-4)的解依赖于边界条件及施加的初始条件。为了检验扩散方程及其解,我们建立下面的边界和初始条件(图1-2):

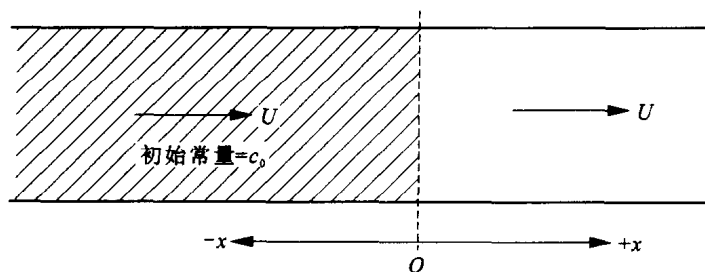


图 1-2 一维湍流扩散方程初始条件图解(在 $x=0$ 处,浓度为常量)

$-\infty < x < +\infty, c = c_0$, 当 $x \leq 0$, c 为常数,那么

$c(x=0, t) = c_0$ 当 $t \geq 0$

$c(x, t=0) = 0$ 当 $x > 0$

$c(\infty, t) = 0$ 当 $t \geq 0$

边壁处的边界条件

初始条件

水道末端的边界条件

基于这些初始条件,美国地质调查局的 Ogata 和 Banks 在一篇学术论文中给出了一维扩散方程(1-4)的解

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} e^{\frac{Ux}{D_t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x+Ut}{2\sqrt{D_t t}}\right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-Ut}{2\sqrt{D_t t}}\right) \quad (1-5)$$

其中,余误差函数 $\operatorname{erfc}(\alpha) = 1 - \operatorname{erf}(\alpha)$

$$\operatorname{erf}(\alpha) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\alpha e^{-\eta^2} d\eta$$

需查数学积分表。给定一些 $\operatorname{erfc}(\alpha)$ 的值: $\operatorname{erfc}(+\infty) = 0$, $\operatorname{erfc}(-\infty) = 2$, $\operatorname{erfc}(0) = 1$ 。图 1-3 表示方程(1-5)。

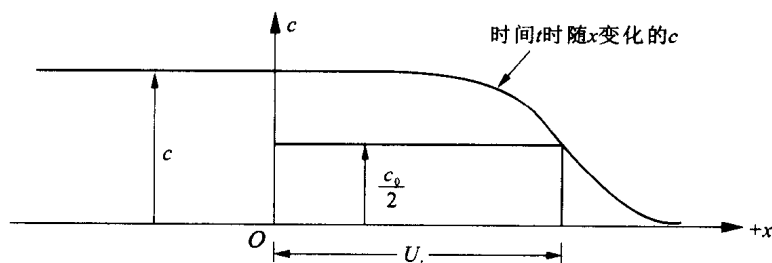


图 1-3 密度流浓度曲线($x=0$ 处,浓度为常量)

浓度曲线上中点 $c = c_0/2$ 以速度 U_t 运动,即如图所示像锋面一样在 x 方向传播。

当 $t \rightarrow \infty$, 对一个正数 U 的固定解为

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} e^{\frac{Ux}{D_t}} \operatorname{erfc}(\infty) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(-\infty) = 1$$

这就意味着当 $t \rightarrow \infty$ 时, $c = c_0$ 。后面我们会用一些室内实验来证明这个方程解的正确性。

1.3.2 三个室内实验

设计了三个实验验证方程解的有效性。

例 1: 当 $U=0$, $u' \neq 0$. 可以通过在矩形水渠放置一个震动的格网来模拟这种特殊条件。

为了保证边界条件,对任意时刻在 $x=0$ 处, $c = c_0$; 我们改变初始条件: 在 x 为负值的区域, $c = 2c_0$ 。方程(1-5)可以写为

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} e^{\frac{Ux}{D_t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x+0}{2\sqrt{D_t t}}\right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-0}{2\sqrt{D_t t}}\right) = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_t t}}\right) \quad (1-6)$$

图示为图 1-4。

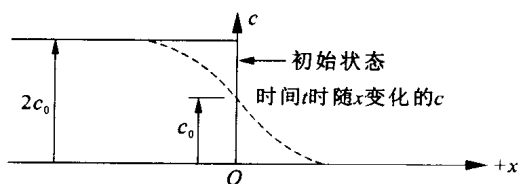


图 1-4 $U=0$, $x=0$ 处浓度为常量,
均匀湍动通过流体

方程(1-6)恒定解为:当 $t \rightarrow \infty$, $\frac{c}{c_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\infty}\right) = \operatorname{erfc}(0) = 1$, 即当 $t \rightarrow \infty$ 时, $c = c_0$ 。

例 2: 已知流速方向与 x 正向相反, 求当 $t \rightarrow \infty$, 方程的恒定解。

根据已知条件, 令 $u = -U_r$, $t = \infty$, 方程(1-5)简化为

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} e^{\frac{-U_r x}{D_t}} \operatorname{erfc}\left[\frac{x - U_r \infty}{2\sqrt{D_t t}}\right] + \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\frac{x + U_r \infty}{2\sqrt{D_t t}}\right] = e^{\frac{-U_r x}{D_t}} \quad (1-7)$$

图示为图 1-5。

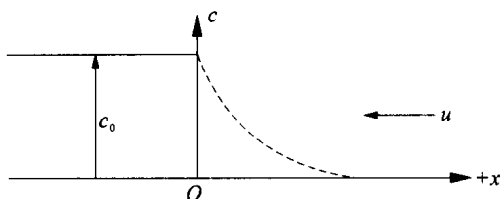


图 1-5 当 $u = -U_r$, $D_t = \text{常量}$ 时,
稳定状态浓度的分布

注意, 这个解与恒定状态的一维扩散方程有关, 即

$$-U_r = \frac{dc}{dx} = \frac{d}{dx}\left(D_{tx} \frac{dc}{dx}\right) \quad (1-8a)$$

其物理含义代表一种在浓度减少的方向($+x$), 无对流的质量通量 $x\left[\frac{d}{dx}\left(D_{tx} \frac{dc}{dx}\right)\right]$ 与水流方向($+x$)的对流质量通量 $x\left(-U_r \frac{dc}{dx}\right)$ 之间的平衡状态。

例 3: 已知扩散系数 $D_x \approx \frac{1}{x}$, $u = -U_r$, $t = \infty$ 。

为保证以上条件, 并防止 $\frac{1}{x} = \frac{1}{0} = \infty$, 假设 $\frac{D_{tx}}{D_0} = \frac{B}{(x+B)}$, 其中 $B = \text{常数}$, D_0 是 D_{tx} 在 $x=0$ 的值。对方程(1-8)求积分得

$$\begin{aligned} \int -U_r dc &= \int d\left(D_{tx} \frac{dc}{dx}\right) \\ -U_r c &= D_{tx} \frac{dc}{dx} = \left(\frac{BD_0}{x+B}\right) \left(\frac{dc}{dx}\right) \end{aligned} \quad (1-8b)$$

为使积分简单, 将原点移到 $x = -B$, 从而 $dx = d(x+B)$ 。

由式(1-8b)求积分, 得

$$-U_r(x+B)dx = \frac{BD_0}{c} dc$$

$$\int_{-B}^x \frac{-U_r(x+B)}{BD_0} d(x+B) = \int_{-B}^x \frac{dc}{c}$$

$$\text{即} \quad -\frac{U_r(x+B)^2}{BD_0(2)} = \ln c - \ln c_0 = \ln \frac{c}{c_0} \quad (1-9)$$

式中, $\frac{c}{c_0} = e^{-\frac{U_r}{2BD_0}(x+B)^2}$ 是一个高斯曲线。

表示方程式(1-9)的图解如图 1-6 所示。

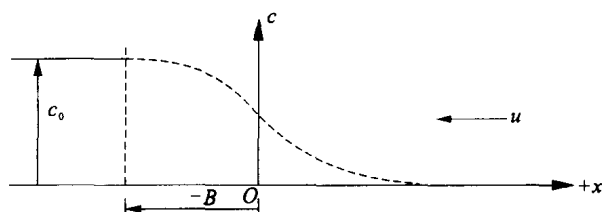


图 1-6 当 $u = -U_r$, D_{tx} 为 x 的反函数, 稳定状态下浓度分布图

1.3.3 在 $x=0$ 处, 注入有限的水体

当 $x=0, t=0$, 横向均匀地加入定量的示踪物质, 物质会向下游对流扩散, U 和 D_t 不随 x 变化。

引入一个函数 $\delta(x)$ 表示上面提到的条件。

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1 \quad (1-10)$$

借助函数 $\delta(x)$, 我们可以将 $t=0$ 时的浓度表示为:

$$c(x, t=0) = \frac{M}{\rho A} \delta(x)$$

式中: $M\delta(x)$ 为瞬时注入量, 其中质量 $M = \rho c A$, A 为截面积。

边界条件为 $c(x = \pm \infty, t) = 0$ 当 $t \geq 0$ 。在这些初始条件和边界条件下, 得出方程(1-4)表示的一维扩散方程的解如下:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{tx} \frac{\partial c}{\partial x} \right)$$

$$c(x, t) = \frac{M}{A\rho \sqrt{4\pi D_t t}} e^{-\frac{(x-Ut)^2}{4D_t t}} \quad (1-11)$$

该解的图形表示示踪物质向下游移动, 扩散形式呈对称的高斯曲线, 浓度峰值以速度 U 运动, 最高浓度 $c_{\max}$ 沿 $+x$ 方向减小(图 1-7)。

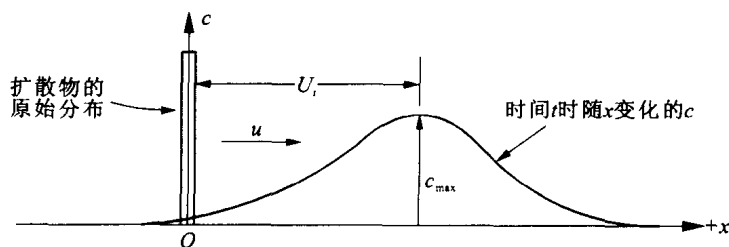


图 1-7 当 $x=0$, 瞬时注入示踪剂的非稳定浓度分布曲线

当 $t \rightarrow \infty$, 方程(1-11)的恒定解为

$$c(x, t = \infty) = \frac{M}{A\rho \sqrt{\infty}} e^{-\infty} = 0 \quad (1-12)$$

1.3.4 随时间变化 $d\tau$ 的射流物质增量 dM

一定剂量的液体 dM 随着时间变化被逐渐注入, 连续的注入速率是单位时间注入的液体质量, 即

$$Q_{in} = dM/d\tau$$

方程(1-11)改写为

$$dc = \frac{dM}{A\rho \sqrt{4\pi D_t(t-\tau)}} e^{\frac{[x-U(t-\tau)]^2}{4D_t(t-\tau)}}$$

Riemann 对该式求积分得到如下解:

$$C = \frac{Q_{in}}{A\rho U} \left[e^{4\alpha} \left(R_1 \mu \frac{1}{2} \right) + \left(R_2 \pm \frac{1}{2} \right) \right]$$

其中, $\alpha = \frac{Ux}{4D_t}$; R_1 是瑞曼积分的第一类型; R_2 是瑞曼积分的第二种类型。

当 $t \rightarrow \infty$, 方程恒定解为

$$c = \frac{Q_{in}}{A\rho U} \quad \text{当 } x > 0; \quad c = \frac{Q_{in}}{A\rho U} e^{\frac{Ux}{D_t}} \quad \text{当 } x < 0 \quad (1-13)$$

1.3.5 剪切流的纵向扩散

浓度变化 $c(x, t)$ 依赖于湍流扩散系数 D_t 以及流体的性质, 例如黏性 μ , 分子扩散率 η 。因为 $D_{\text{湍流}}$ 不是流体的性质, 我们需要建立 D_t 与流体的特性之间的相关关系, 类似于 $\mu = \frac{\tau}{\partial u / \partial y}$ 等。

考虑管道中的湍流(在 $r-x$ 的二维平面)径向速度变化 Δu 是示踪物纵向扩散的决定因素, 已知“扩散”是由于相邻层以不同速度运动引起的径向混合, 我们称 D_L 为扩散系数, 测出对管道直段流体 D_L 比 D_t 大 200 倍, 而且在管道弯曲处 D_L 更大(图 1-8)。

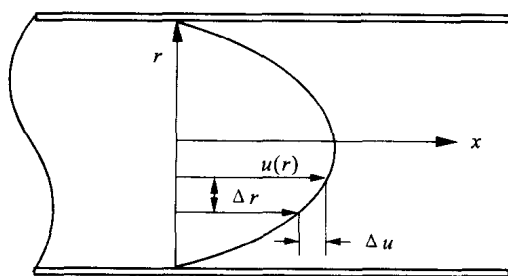


图 1-8 管道湍流的速度剖面

为建立 D_L 与流体的容器特征之间的关系, 泰勒(G. I. Taylor)提出对于管道内流体

$$D_L = 10.1 r_0 u' \quad (1-14)$$

式中: r_0 为管道半径; $u' = \sqrt{\tau_0/\rho}$ 。

对于明渠, 哈勒曼(Harleman)提出:

$$D_L = 14.3 R \sqrt{2gRS_e} \quad (1-15)$$

式中: R 为水力半径; S_e 为能量梯度; g 为重力加速度。