



“十二五”环境科学与工程系列规划教材

环境流体力学

黄河清 编 著

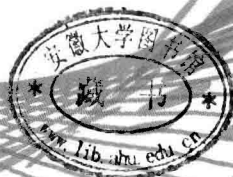
合肥工业大学出版社



“十二五”环境科学与工程系列规划

环境流体力学

黄河清 编 著



合肥工业大学出版社

责任编辑 张择瑞
封面设计 汪哂秋

图书在版编目(CIP)数据

环境流体力学/黄河清编著. —合肥:合肥工业大学出版社,2013.7
ISBN 978-7-5650-1016-3

I. ①环… II. ①黄… 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(2012)第 285452 号

环境流体力学

黄河清 编 著

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2013 年 7 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2013 年 7 月第 1 次印刷
邮 编	230009	开 本	710 毫米×1010 毫米 1/16
电 话	综合图书编辑部:0551—62903204	印 张	17.5
	市 场 营 销 部:0551—62903198	字 数	333 千字
网 址	www.hfutpress.com.cn	印 刷	安徽省瑞隆印务有限公司
E-mail	hfutpress@163.com	发 行	全国新华书店

主编信箱	heqingh@sina.com	责编信箱/热线	zrsg2020@163.com 13965102038
------	------------------	---------	------------------------------

ISBN 978-7-5650-1016-3

定价: 38.00 元(含教学光盘 1 张)

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

《环境流体力学》编委会

主 任 黄河清

编 委 吴亚坤 郭彦英 吴 玮

周扬屏 郭丽娜

代 序

黄河清教授早年留学日本、美国分获硕士及博士学位，自 2008 年归国后一直从事环境流体力学特别是有关重力流的研究及教学，收获颇丰。在其多年研究及教学的基础上，编著了此书。在我看来该书开创了“环境流体力学”先河，在基础知识取舍、章节安排也有独到之处，是一部环境学科的好教材。

一、知识结构新而全面，系统而又循序渐进地介绍了与环境流体力学相关的高等数学、量纲分析、本构方程、湍流、有解析解模型、数值模拟基础及重力流的最新研究成果。

二、内容精湛匠心独具，编著者将高等数学、流体力学的基础知识和环境流体力学的内容作了恰如其分地完美结合；结合环境流体力学深入研究的需求，作了全新、涵盖广而又难度适中的介绍；而对具解析解的有关环境污染物数学模型及计算流体力学作了最为简约及全面的概括，全书融为一体。

三、各章节中均不乏创新之作，书中提出的基于瞬时源模型涌出曲线上的三点计算污染物源强、扩散系数及环境流体流速的公式，比水重或轻的污染物在三维弯曲河道的中间及岸边释放的分布特征、水下重力流的临界弗雷德数和明渠流不同，可以大于 1、小于 1 或不存在，以及有关三维海底弯曲峡谷中浊流流动及沉积特征的研究等都是编著者近年来在国际相关权威学术期刊上发表的有一定应用价值的最新研究成果。

当然我不是说该书十全十美，书中语言行文的准确性及流畅性等方面都有可提高的空间，且内容涵盖范围似乎宽泛，作为教材的话可能难以在一学期教完，但不失为开卷有益，不失为广大环境学科的研究人员、在校研究生及高年级学生的有关环境流体力学的一本不可多得的参考书。

中国工程院院士 張傑

2013年6月2日

于哈尔滨工业大学

前 言

国内有关环境流体力学或环境水力学的教材不多且内容大致相仿,包括迁移扩散理论、射流、羽流和浮射流、河流、河口及海湾的混合、分层流等。这些教材的不足之处有两点:一是缺乏整体的理论系统性,比如射流、羽流和浮射流、河流、河口及海湾的混合等都是偏经验的内容过多,有大量的经验公式而难以抓住重点;二是没有包含越来越重要的数值模拟内容。所以本书准备针对此两点不足,对环境流体力学内容做一个全新的整合,以达到内容系统、重点突出、理论及数值模拟兼顾。

本书不类同于国内任何一本相关教材,在作者多年研究及教学的基础上,不企求对传统环境流体力学作面面俱到的阐述,但希望通过本书帮助学生打好牢固的有关环境流体力学的重要的数理及数值模拟的基础,并帮助学生及相关科研人员了解该领域前沿的一些内容,使他们能够阅读理解国内外这方面研究的论文及专著,结合自己的研究方向,作进一步的发展研究。

随书赠送的光盘不仅含有教学用 PPT 文件、试用版的环境流体模拟软件 Simusoft,还在 Codes Related 文件夹提供了书中第二、六、七章中提及的典型的 Matlab 计算及作图程序,供读者参考、学习及改进用。

本书内容丰富有趣,99%以上用到的公式均有推导,讲解力求简单明了、清晰易懂,重视系统的基础理论及方法,融入 21 世纪最新的研究成果。

本书编著者感谢国家自然科学基金项目(40972086, 41172103)的资助,我的研究生叶家盛同学帮助绘制了书中部分插图,特别感谢合肥工业大学出版社张择瑞编辑不断的鼓励、督促,经一年多的努力,终于完成了书稿;后交予各编著委阅读检查及提出修改意见,力争减少错误、通俗而又不乏深度及广度;但由于学识有限,书中可能难免有不妥及可改进之处,恳请各方有识之士不吝赐教。最后衷心感谢中国工程院张杰院士在百忙之中为本书作了可贵的序。

黄河清

2013 年 6 月 15 日

目 录

第 1 章 绪论	(001)
1.1 环境流体力学的重要性	(001)
1.2 环境流体力学的研究内容及方法	(007)
1.3 环境流体力学的一些基本概念	(008)
1.4 环境流体力学发展概况	(010)
1.5 本书后续章节计划安排	(011)
复习思考题	(013)
参考文献	(013)
第 2 章 相关高等数学知识	(014)
2.1 基本微积分	(014)
2.2 高斯定理及速度的散度和旋度	(018)
2.3 张量基础	(021)
2.4 微分方程基础	(027)
2.5 常用特殊函数	(033)
2.6 偏微分方程基础	(036)
2.7 MATLAB 快速入门	(040)
2.8 常用非线性方程求解法	(054)
复习思考题	(059)
参考文献	(060)
第 3 章 相似原理和量纲分析	(061)
3.1 量纲及量纲和谐原理	(061)
3.2 相似原理、相似准则及模型试验	(062)

3.3	量纲分析	(065)
3.4	基本方程的无量纲化	(068)
3.5	应用量纲分析法解偏微分方程	(069)
	复习思考题	(071)
	参考文献	(071)
第4章 环境流体力学基本方程		(072)
4.1	物质导数/随体导数	(072)
4.2	雷诺运输方程	(073)
4.3	连续方程/质量守恒方程	(075)
4.4	动量方程	(075)
4.5	能量方程	(078)
4.6	标量传质方程	(082)
4.7	饱和及非饱和区地下水的运动、质量守恒及传质方程	(084)
	复习思考题	(088)
	参考文献	(088)
第5章 湍流基础		(089)
5.1	湍流基本特征	(089)
5.2	层流向湍流的转变	(091)
5.3	湍流研究的一些基本方法、假设及结论	(094)
5.4	两类基本湍流的均流及脉动速度特性	(097)
5.5	雷诺分解及雷诺平均方程	(102)
5.6	基于雷诺平均方程的湍流模型概要	(107)
5.7	湍流标准 $k-\epsilon$ 模型	(108)
	复习思考题	(113)
	参考文献	(114)
第6章 具解析解的污染物迁移模型		(115)
6.1	污染物在环境流体中迁移的物理过程	(115)
6.2	剪切流的离散或弥散	(117)

6.3 几种具解析解的一维模型	(121)
6.4 几种具解析解的二维及三维模型	(132)
6.5 根据解析解及实验数据确定扩散系数的方法	(135)
6.6 一维河流水质模型简介	(145)
6.7 二维河流的污染物中心及岸边释放模型	(155)
复习思考题	(159)
参考文献	(160)
第7章 计算流体力学基础	(161)
7.1 数值模拟的必要性、可能性及其局限性	(161)
7.2 数值模拟的一些基本概念	(162)
7.3 数值模拟的基本步骤	(164)
7.4 基本的离散化方法	(175)
7.5 有限体积法简介	(187)
7.6 非恒定问题的解法	(193)
7.7 RANS 的数值计算解法	(201)
复习思考题	(208)
参考文献	(209)
第8章 重力流研究专题	(210)
8.1 重力流概述	(210)
8.2 重力流 RANS 模型方程	(213)
8.3 重力流数值模拟和实验的对比研究	(217)
8.4 三维弯曲河道中保守污染物的随流搬运特征	(228)
8.5 重力流深度平均模型简介	(239)
8.6 有关重力流的重要无量纲数	(247)
8.7 三维海底峡谷中浊流流动及其沉积研究简介	(252)
复习思考题	(263)
参考文献	(263)

第1章 绪 论

这一章,我们将重点介绍环境流体力学所要涉及的一些基本概念及其研究内容和方法,最后在回顾环境流体力学发展的基础上介绍一下本书各章内容的安排。

1.1 环境流体力学的重要性

一言以蔽之,环境流体力学(Environmental Fluid Mechanics)是应用流体力学的知识来研究环境污染物在环境流体中的输移、扩散及转化规律与应用的学科。与之密切相关的环境水力学(Environmental Hydraulics)则研究污染物在水环境中的变化规律。我们可以说生活在流体的包围之中,大气、海洋、河流、湖泊、地下水及输水或油管道中的水油等都可以说是广义的环境流体。人类文明的发展特别是近年来在快速创造物质财富的同时,也对环境造成许多超过其自我修复能力的污染,危及人们的生活质量及生存。

先看海洋,曾经是碧波荡漾、有着丰富渔业资源的海洋近几十年来由于受到如图 1-1a 所示的油轮事故及油井泄漏等的原油、大雨及洪水冲至海洋的塑料袋、玻璃瓶、鞋及包装材料等的固体垃圾、海洋排污及开采等造成的水银、二恶英、多氯联苯(PCBs/polychlorinated biphenyls)及多环芳烃(PAHs/polycyclic aromatic hydrocarbon)积聚的污染,一些地方如黑海由于受到来自多瑙河流域 8000 多万人口的生活污水所带来的大量的年以万吨计的氮、磷等,加上多种毒物质在底部聚集,其 90% 以上的水体已变成动植物难以生存的死水。我国的黄海每年接受来自黄河流域的不仅是大量的形成黄颜色的泥沙,还有以百吨计的镉、汞、铅、锌、砷等重金属,1981~1984 年的监测表明,其内虾、螃蟹等甲壳类动物体内镉的含量增加了 2 倍;1989 年的监测显示贝壳类动物体内的汞含量超标达 10 倍以上;1963 年青岛沿海观察到的 141 种海洋动物到 1988 年,仅有 24 种。

再看湖泊,湖泊普遍存在着和上述黑海因人类生产生活所排放的大量的氮、磷等养分而带来的富营养化问题。湖泊的水量因和海洋相比相对较少,流动性也较

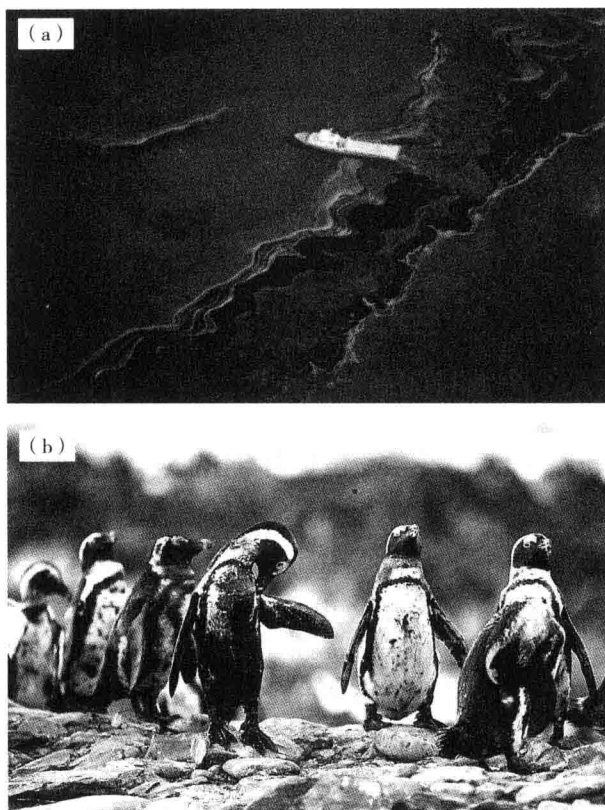


图 1-1 2010 年美国墨西哥湾的原油泄漏(a)及受原油污染生存受到威胁的企鹅(b)

弱,所以比海洋更易形成污染。全球约 75% 的湖泊及水库都存在富营养化问题。我国湖泊面积约占国土面积的 1%,由于工业化、城市化及现代农业的飞速发展,大量营养元素及有机物被排入湖中,带来藻类的过度繁殖,使水质不断恶化(赵永宏等,2010)。据统计我国主要湖泊中,已达富营养程度的已过半。五大淡水湖中,太湖、洪泽湖、巢湖已达富营养水平,鄱阳湖、洞庭湖为中营养水平(韦立峰,2006)。“落霞与孤鹜齐飞,秋水共长天一色”怕已成为稀有景色。在过去的十几年中,政府投入了大量的人力与物力治理湖泊污染问题,但收效甚微。如对太湖在“十一五”期间尽管投入了近 20 亿的治理资金,如图 1-2 所示的蓝藻水华还几乎是连年爆发,2007 年 6 月腐烂发臭的水华团飘至无锡市取水口附近,采样测得的总氮、总磷及锰法 COD 的浓度分别高达 23.4mg/L、1.05mg/L 及 53.6mg/L,为正常时的 10~20 倍危及无锡的生活用水,无锡市民纷纷抢购超市内的纯净水,街头零售的桶装纯净水也出现了较大的价格波动(秦伯强,2007)。

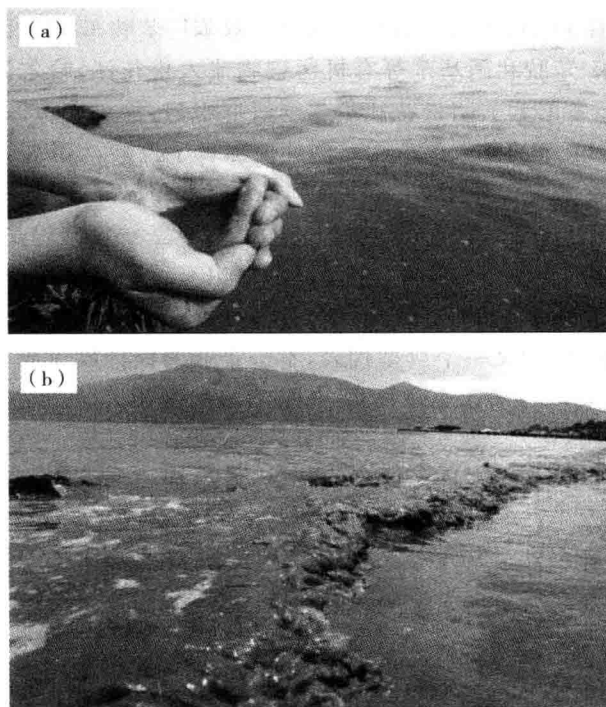


图 1-2 多种原因污染带来的富营养化引起的江苏太湖(a)及云南滇池(b)的蓝藻暴发

河流及其流域的交通便利及肥沃的土壤一直支持着人类文明的衍生与发展。但因城市生活污水逐年增加,污水处理严重滞后,以及大量的面源污染问题尚未找到好的解决途径,河流污染问题也是逐渐加重。古诗中的“清泉石上流……随意春芳息”的美景对于城中的人来说,越来越要靠想象力去理解了。根据《全国环境质量报告书》(1993)的统计结果,水污染严重的河流,依次为:海河、辽河、淮河、黄河、松花江、长江、珠江。其中海河劣于Ⅴ类(不适合灌溉用)水质河段高达 56.7%,辽河达 37%,黄河达 36.1%。长江干流劣于Ⅲ类(不适于人体直接接触如游泳用等)水的断面已达 38%,比 8 年前上升了 20.5%。1999 年,在黄河流域的 114 个重点监测断面上,Ⅴ类和劣Ⅴ类水体分别为 70%和 56.2%。河流污染是指直接或间接排入河流的污染物造成河水水质恶化的现象,其主要特点有:①污染程度随径流量而变化,河流径流量愈大,污染程度愈低;②污染物扩散快,上游遭受污染会很快影响到下游;③污染危害大,污染物通过饮水可直接毒害人体,也可通过食物链和灌溉农田间接危及人身健康;④有一定的自净能力。近年来,沿河企业为单纯追求经

济利益,而忽视环境和生态效益,或化学毒品船的倾覆所造成的污染事件时有发生。2005年11月13日,中石油吉林石化公司双苯厂苯胺车间发生爆炸事故,事故产生的约100t苯、苯胺和硝基苯等有机污染物流入松花江,哈尔滨市政府随即决定,于11月23日零时起关闭松花江哈尔滨段取水口,停止向市区供水,哈尔滨全城停水四天,哈尔滨市的各大超市无一例外地出现了抢购饮用水的场面。2010年7月28日,吉林省永吉县某化工厂1000多只装有三甲基一氯硅烷的原料桶,被冲入松花江,顺松花江水流冲往下游(图1-3b)。三甲基一氯硅烷是无色透明液体,有刺激臭味,受热或遇水分解放热,会分解释放出有毒的腐蚀性烟气,对两岸群众饮水安全造成严重威胁。2012年春节期间广西龙江河流域发生的镉污染事件可以说是此类污染事件的又一个典型代表,不法企业的镉排放造成了300多千米河段的严重的镉污染,4万多千克鱼死亡,并且威胁到柳州市的用水安全。镉的化合物毒性大,蓄积性也很强,动物吸收的镉很少能排出体外。受镉污染的河水用作灌溉农田,可引起土壤镉污染,进而污染农作物,最后影响到人体。日本的痛痛病就是吃了被含镉污水生产的稻米所致。镉进入人体后,主要贮存在肝、肾等组织中不易排出。镉的慢性毒性主要使肾脏吸收能力不全,降低机体免疫能力及导致骨质疏松、软化,如骨痛病所出现的骨萎缩、变形、骨折等。





图 1-3 某城生活污水直接排放至河流(a)及被洪水冲入松花江的化工原料桶(b)

地下水是水循环中的重要一环,含有较河流及湖泊更多的淡水,流动极其缓慢,因此,地下水污染具有过程缓慢、不易发现和难以治理的特点。地下水一般以渗流的方式补给河流、湖泊和湿地等,也以地下径流的方式流入海洋,所以地下水一经污染,即使彻底消除其污染源,其水质的恢复也将是一个漫长的过程,污染有可能被传至其补给的河流、湖泊和海洋区域。如图 1-4 所示,地下水可能会因垃圾填埋、化粪池、地面储油罐以及雨水等携带的面污染物的渗透而受到污染。20

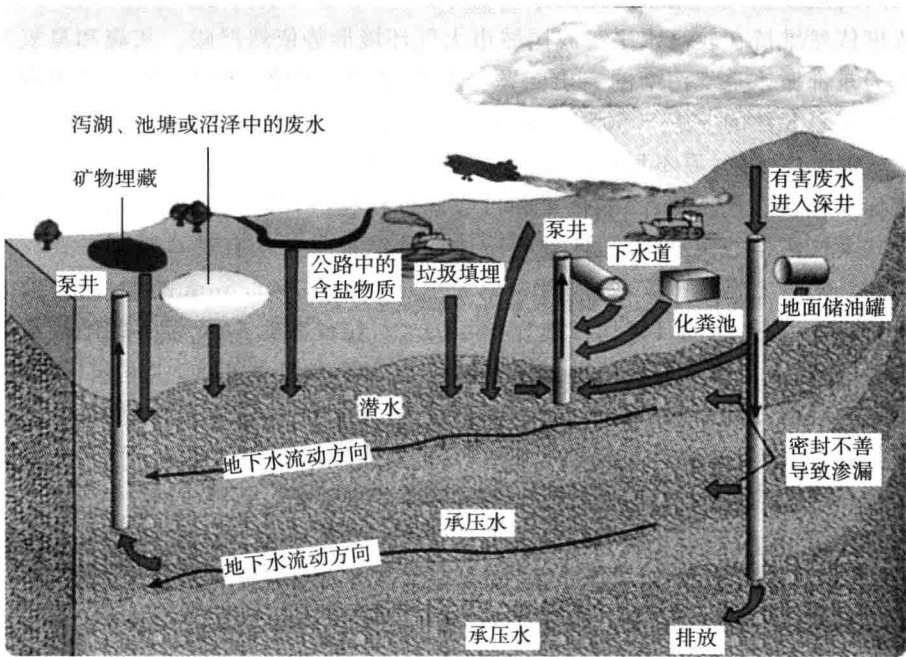


图 1-4 地下水污染污染源示意图

世纪 90 年代初,北京某地发生一起恶性柴油泄漏事件,78t 柴油在一周内全部渗入包气带和潜水含水层,致使附近的水源遭受严重污染,水厂被迫停产,影响供水范围波及 36km^2 。另外地下水污染和河流污染也是密切相关的,上述广西龙江河发生的镉污染严重超标的原因是之一就是一矿厂未按规定建设,渣场防渗漏措施不完善而导致矿渣渗滤液对周边地下水、土壤造成了严重污染,进而渗入龙江河;还有另一家黑心工厂则将未经处理的含高浓度镉的污染水直接排入和地下水相连的溶洞水中。两家企业的主要负责人均受到了法律的惩处。

大气污染所带来的损害极其广泛,许多时候并不表现为如图 1-5 所示的烟气或毒雾酸雨这类形式,但各种生物无不经常受其影响,对森林和农作物的损害尤为显著。经常呼吸污浊的空气,对人体的健康也是威胁,特别是呼吸道疾病会因此增加。长期生活在被严重污染的大气环境中,犹如慢性中毒。2013 年春节期间以北京为代表的我国多个省市的连续达几十天的雾霾天气,PM2.5 超标达 10 倍以上,严重影响了人们的正常生活及工作,使我们都切身体会到了清洁空气的重要性。历史上比较著名的有 1952 年在英国发生了“伦敦烟雾事件”,连续 4 天高浓度的大气污染,造成约 4000 人死亡。环境保护部部长周生贤 2009 年受国务院委托向全国人大常委会报告当前大气污染防治工作的进展情况时如是说,2008 年,全国 23.2% 的城市空气质量未达到国家二级标准,城市空气中的可吸入颗粒物、二氧化硫浓度依然维持在较高水平。我国城市大气环境形势依然严峻。灰霾和臭氧污染已成为东部城市空气污染的突出问题。上海、广州、天津、深圳等城市的灰霾天数已占全年总天数的 30%~50%。灰霾和臭氧污染不仅直接危害人体健康,而且造成大气能见度下降,看不见蓝天,使公众对大气环境不满。我国目前的空气质量评价指标仅包括二氧化硫、二氧化氮和可吸入颗粒物(PM10)三项污染物,尚不能完全反映大气污染的实际状况,使空气质量评价结果与公众直观感受不一致。比较突出的是国际上发达国家均将 PM2.5(空气中粒径小于 $2.5\mu\text{m}$ 的颗粒物)纳入空气质量标准,如美国的日平均标准为 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。粒径在 $2.5\mu\text{m}$ 以下的细颗粒物不易被阻挡,吸入人体后会直接进入支气管,干扰肺部的气体交换,引发包括哮喘、支气管炎和心血管病等方面的疾病。这些颗粒还可以通过支气管和肺泡进入血液,其中的有害气体、重金属等溶解在血液中,对人体健康的伤害更大;PM2.5 还可成为病毒和细菌的载体,为呼吸道传染病的传播推波助澜。若将 PM2.5 纳入空气质量评价体系,我国大部分城市的空气质量可能都会不合格。2012 年春节期间的英国的《经济学人》杂志利用卫星数据,发表全中国各省空气质量的测量数据,指出中国除了黑龙江、西藏和海南三个省份外,其他省份空气中的年平均 PM2.5 含量都高于世界卫生组织定下的 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 安全水平。山东与河南的情况最为严重,PM2.5 含量超过 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$,为安全水平的 5 倍。

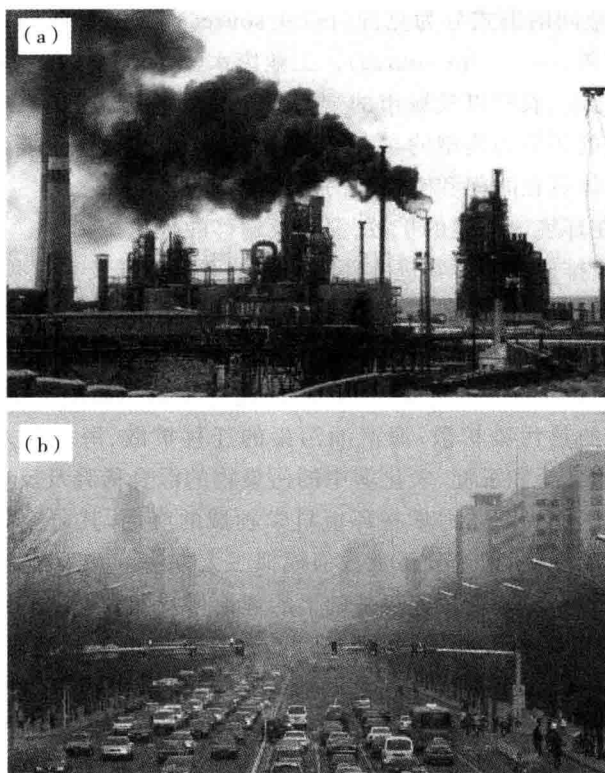


图 1-5 工业烟气的排放(a)及城市汽车排气(b)
是大气污染的两个重要原因

综上所述,可见我们周边的海洋、湖泊、河流及大气等均遭到了严重的污染或处于可能被污染的危险之中。研究上述诸多环境流体中的污染问题,需要我们很好地学习掌握流体力学及环境科学的知识,分析污染的成因及传输过程,对其可能形成的危害提前做出科学的预测,评价各种可选择的防范及治理措施的优劣,从而为保护及改善我们的生活环境、实现可持续发展的科学决策及选择成本效益高的最佳的治理方案等提供有力的科学依据。

1.2 环境流体力学的研究内容及方法

造成环境污染的污染物有物理污染物(热、放射性等)、化学污染物(无机及有机污染物、重金属等)和生物污染物(病菌、病毒等)等(杨志峰,2005)。污染源按其是否随时间变化,分为瞬时源(instantaneous source)及连续源(continuous

source);按其空间的形式分为点源(point source)、线源及面源。线源及面源一般又被称为非点源(non-point source)。工业废水及生活污水的排放是典型的点源污染;而农业的化肥、农药以及城市的烟气、粉尘等污染物随降雨的地表径流进入各种水体而形成的污染为典型的非点源污染。环境流体力学主要研究的是这些污染物进入环境流体后在时间和空间上的变化规律,具体有:

(1) 污染物在环境流体中的扩散、混合及输移的规律;

(2) 不同形式排放的污染物进入环境流体的污染特征及变化规律,为环境污染的控制管理及污染事故作出准确的预警预报及对拟建水利工程等进行环境影响评价,为决策提供科学依据;

(3) 随着环境治理保护工作的开展,对环境流体力学提出了越来越多的课题,如工业高温废水的热污染扩散;海湾油污染的迁移扩散、海水侵入的淡盐水的混合、废水处理中的曝气和沉淀、氧化塘中的污染物的混合稀释及反应过程等。

环境流体力学作为流体力学在环境科学领域的应用,其研究方法当然也继承了流体力学的实验研究、理论分析及数值模拟三大方法。实践出真知,实践实验是许多科学知识的源头。建立在实验基础上的理论可帮助我们宏观上或微观上进一步地理解客观世界,指导我们更好地实践,并且理论也是我们建立数学模型、进行数值模拟的基础。由于描述流体及运动的质量、动量及污染物的传输方程均为至今没有普遍理论解的复杂的偏微分方程,其解随各个特定问题的初始及边界条件的不同而不同,因此对现实中的实际问题,很多情形下单纯的理论分析是不够的,还需进行实验模拟或数值模拟研究以得到进一步的定量的结论。过去侧重于实验模拟,近十年来,随着计算机硬件及计算技术的飞速发展,数值模拟也发挥着越来越重要的作用。

1.3 环境流体力学的一些基本概念

学习一门新知识一般包括两项基本内容:一是有关的基本概念,这是基础;二是相关的基本的定理、定律等。环境流体力学的基本概念部分来自于环境科学如浓度、保守物质等,部分则来自流体力学如密度、黏性等。下面我们要在环境流体的背景下考察它们。

1.3.1 密度(Density)

流体密度为单位体积流体的质量,一般以希腊字母 ρ [rho] 来表示,量纲为 $[ML^{-3}]$,其中 M 表示质量, L 表示长度,常用单位为 kg/m^3 。水的密度在一个大气