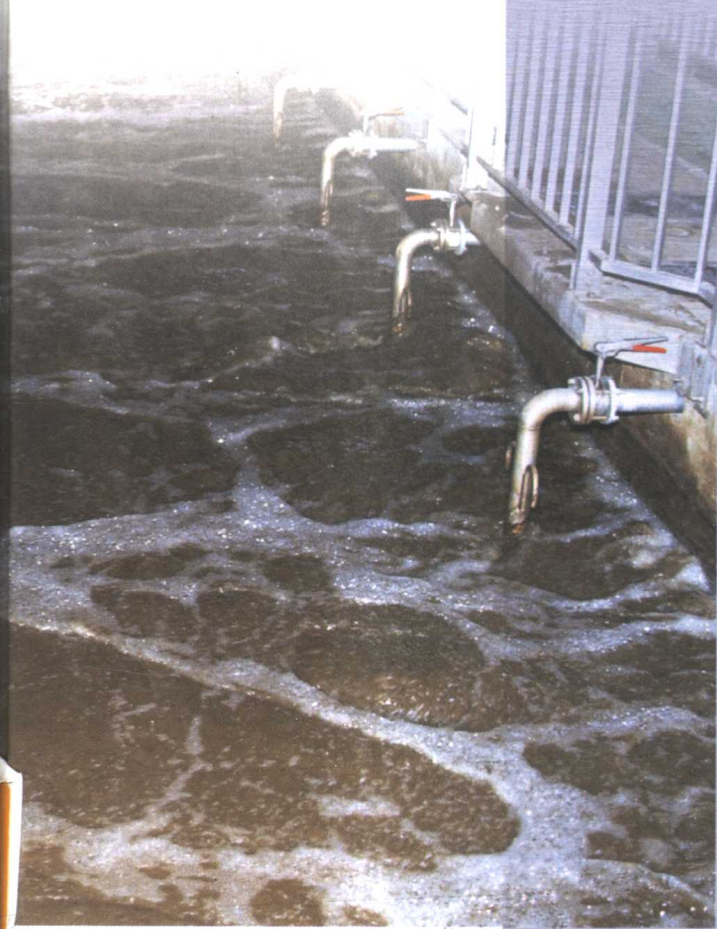


污水排放 工程水力学

郭振仁 著



科学出版社

污水排放工程水力学

郭振仁 著

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书在讨论污染物在水体中的运动机理基础上,针对污水(或污染物)排到河流和海洋的各种情形,系统地介绍了各种排放条件及环境条件下排放点近区稀释度、混合区及中远区污染带的解析与经验计算方法,包括可降解物质浓度场的解析计算,同时总结了污水海洋处置放流系统的水力设计理论,包括海水清除与防止入侵设计。书中对解决同一问题的不同方法进行了比较分析,进而推荐较为可靠的方法。

本书吸取了近年该学科的许多最新研究成果,包括作者本人近十年的若干有关研究成果和新的学术观点,可供排水工程设计、环境咨询、科研与监测人员和大专院校有关专业师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

污水排放工程水力学/郭振仁著. —北京:科学出版社,2001

ISBN 7-03-009612-6

I. 污… II. 郭… III. 污水—排水工程—水力学 IV. TU992.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 046183 号

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>

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2001年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2001年9月第一次印刷 印张:18 1/4

印数:1—1 200 字数:415 000

定价:46.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈杨中〉)

作者简介



郭振仁,先后毕业于重庆建筑工程学院、清华大学和中国水利水电科学研究院,1988年获博士学位。历任国家环境保护总局华南环境科学研究所研究室主任、高级工程师、科技处处长、副所长、研究员。1992~1993年在伦敦大学英皇学院及帝国理工学院做研究工作。1993~1994年在加拿大纽芬兰纪念大学做博士后研究,1995~1998年被聘为该校客座教授。1999~2000年在香港大学任教。主要研究领域为环境水力学、河流与近海水质保护、环境管理政策与标准、环境影响评价与环境规划。主持过数项国家重点项目和国际合作项目,获得省部级和厅局级科技进步奖10项,在国内外正式发表论文30多篇。

EAB04/02

前 言

污水排放工程水力学(Waste Discharge Hydraulics)汇集污水排放工程中遇到的广泛而又特殊的水力学问题及其解决方法,包括关于污染物进入受纳水体后的运动规律的知识 and 排放工程自身的水力设计两部分。由于这两部分内容的相互关系密切,因此把它们放在一起,有利于从解决污水排放的水力学问题的角度自成一统,这是本书在内容组织上的特别考虑。实际上前述的第一部分就是环境水力学的主要内容;第二部分则接近传统水力学的有关内容。

随着我国的经济和城市化规模日益扩大,水资源消耗和污水排放量显著增加,如何利用水力学理论和方法减轻水污染或避免水污染危害是常常要摆到工程技术人员面前的课题。本书作者长期在环保专业科研机构工作,转向左边,会面对基础研究任务;转向右边,会面对大量实际问题。本书力图尽量利用上述有利条件,在方法介绍时一方面努力做到阐述基本概念、机理和理论基础的系统性和完整性,另一方面又尤其注重与实际应用相结合,特别是与环境管理的要求相结合。

为了使一般读者都能掌握和应用本书介绍的方法,本书着重总结了针对各种实际问题的计算公式——解析的和经验的,某些地方还刻意做了有益的简化。当对同一个问题有多个解决方法或计算公式时,则加以分析对比,以推荐相对较可靠的公式或方法。由于本书涉及的学科内容远远未达到最终成熟和完善,因此介绍中作者对存在的问题也特别给予提示,以期引起研究者的注意和兴趣。

本书试图尽量吸收相关学科近年的最新研究成果,也包括了作者本人近十年的若干研究成果和学术观点。书中相当部分的内容来自作者在香港大学讲课时的讲义。作者对李行伟(Joseph H. W. Lee)教授允许使用他多年蒐集的资料及给予的真诚鼓励表示衷心的感谢。

本书的插图由郑琪和黄华毅两位研究生精心制作,彭海君高级工程师也准备了部分插图,在此一并致谢。作者还想借此机会感谢家人特别是妻子林芝给予的一贯支持。

由于作者水平有限,加之成书仓促,书中一定存在不少缺点错误,诚望读者指正。

作 者

2001年7月

目 录

前言

第一章 绪论	(1)
第一节 污水排放工程提出的水力学任务	(1)
一、岸边排放	(1)
二、污水海洋处置	(1)
三、污水排放与射流	(8)
四、污染物浓度场过程	(9)
五、放流系统水力学	(11)
第二节 环境保护要求与策略	(12)
一、有关的环境标准	(12)
二、满足水质要求的基本策略	(15)
第二章 污染物在水体中的运动	(16)
第一节 随流	(16)
第二节 分子扩散	(16)
第三节 紊动扩散	(17)
一、水流紊动现象	(17)
二、经典紊流理论概要	(23)
三、紊流的输运作用	(26)
四、随流-扩散方程	(29)
第四节 剪切流中的离散	(32)
一、剪切流中的离散现象	(32)
二、一维层流中的离散	(32)
三、一维紊流中的离散	(37)
四、非恒定剪切流中的离散	(38)
五、二维与三维流动中离散问题	(40)
第五节 关于几种运动形式的总结与讨论	(43)
第六节 降解	(43)
第七节 污染物运动的基本方程	(44)
一、按水流特点考虑	(44)
二、按排放源考虑	(45)
第三章 河流中的浓度场计算	(47)
第一节 随流-扩散方程的解	(47)
一、静水瞬时源	(47)
二、动水瞬时源	(51)

三、静水连续源	(52)
四、动水连续源	(54)
第二节 天然河流中的混合	(56)
一、河流中混合的三个阶段	(56)
二、河流中的紊动扩散系数	(57)
三、河流的纵向离散系数	(59)
第三节 保守物质的浓度场	(61)
一、三维区段	(61)
二、二维区段	(62)
三、一维区段	(70)
四、边界反射问题	(71)
第四节 可降解物质的浓度场	(77)
一、一维问题	(78)
二、二维问题	(80)
第五节 累积流量坐标法	(84)
一、基本方程及其解	(84)
二、流量-坐标关系作图法	(86)
第六节 允许排放量计算	(87)
一、一维计算	(87)
二、二维检验	(90)
第七节 改善解的可信度的方法	(93)
第四章 污水海洋处置初始稀释	(96)
第一节 基本假定和基本方法	(96)
一、射流、羽流和浮射流的区分	(96)
二、关于射流和羽流的三个假定	(96)
三、射流和羽流的基本研究方法	(102)
第二节 静水条件下的紊动射流	(103)
一、紊动射流的动量守恒	(103)
二、圆射流	(104)
三、平面射流	(109)
四、周边射流	(113)
五、小结	(118)
第三节 静水条件下的浮力羽流	(120)
一、羽流浮力通量守恒	(120)
二、点源浮力羽流	(122)
三、线源浮力羽流	(127)
四、小结	(131)
五、射流与浮力羽流的对比总结	(133)
第四节 静水条件下的浮射流	(134)

一、浮射流的特征长度	(134)
二、圆形浮射流的计算	(136)
三、平面浮射流的稀释度计算	(148)
四、浮力周边射流	(151)
第五节 环境水体分层条件下的计算	(153)
一、环境分层条件下浮力羽流的运动	(153)
二、线性分层条件下的计算	(154)
三、非线性分层条件下的计算	(157)
第六节 浮射流倾角的影响	(158)
一、均匀环境下的积分模型数值解	(159)
二、均匀环境下的计算公式	(164)
三、环境分层条件下的计算公式	(173)
四、环境分层条件下的数值计算	(173)
第七节 动水条件下的计算	(178)
一、在流动水体中的浮射流	(178)
二、三个经验公式及其问题	(180)
三、量纲分析与渐近分析	(182)
四、热子类比	(184)
五、公式总结及讨论	(187)
六、密度分层横流中的浮射流	(190)
七、横流中的水平浮射流	(191)
八、流动水体中的周边射流	(197)
九、横流中的线源浮力羽流	(198)
十、数学模型	(199)
第八节 表面射流	(199)
一、排入静水的浮力表面射流	(200)
二、排入动水的浮力表面射流	(202)
第五章 混合区与后续稀释	(205)
第一节 后续稀释	(205)
一、污染物在海洋中的紊动扩散	(205)
二、布鲁克斯模型	(208)
三、潮汐回荡作用下的计算	(216)
第二节 混合区	(216)
一、混合区的定义	(216)
二、污水场的近区形态	(217)
三、混合区的近似估计	(220)
第三节 可降解物质的浓度预测	(222)
一、一般公式	(222)
二、大肠菌群浓度计算	(224)

第六章 放流系统水力设计	(227)
第一节 满足环境要求的系统设计	(227)
一、基本步骤与要求	(227)
二、扩散器长度初步估算	(227)
三、孔口及其间距设计	(228)
第二节 扩散器水力设计	(232)
一、出流系数法	(232)
二、动压头法	(241)
三、立管均匀出流设计	(243)
第三节 海水清除与防止入侵设计	(245)
一、清除流量与入侵临界流量的估算公式	(245)
二、适用于顶部连接的扩散器的数学模型	(249)
三、适用于底部连接的扩散器的数学模型	(257)
四、影响清除与入侵的因素分析	(260)
五、关于数学模型的几点讨论	(266)
参考文献	(268)
习题	(271)
附录 I 海水密度的一种估计方法	(276)
附录 II 污水海洋处置工程污染控制标准	(277)

第一章 绪 论

第一节 污水排放工程提出的水力学任务

在我国,随着经济的快速增长和城市化规模的不断扩大,在现有技术水平条件下,工业与生活用水量及所产生的污水量也日益增大。这些污水无论经过处理与否,最终绝大部分都要排入环境水体,并携带一定的污染负荷。污水排放是否会造成水质污染既取决于污水及环境水体中的污染物浓度,又取决于排放方式和受纳水域的水文条件。由于后者,污水排放工程给水力学提出了广泛而重要的任务。

一、岸 边 排 放

对污水可以采用岸边排放的方式排放,也可以采用离岸排放的方式排放。离岸排放的目的是使污水更好地与环境水体混合而被稀释,从而形成比岸边排放较低的浓度分布,使环境要求更容易得到满足。而且,岸边水体往往是人群接触较频繁、使用较多的水体,因而是更敏感和应优先保护的水体。然而,污水岸边排放是一种最为普遍的传统做法。有些岸边排放的污水是经过处理的(排放口即污水处理设施的出水口),被认为没有必要再进行离岸排放。而许多岸边排放的污水则完全没有经过处理,这是因为我国目前尚无足够的投入对所有污水采取完全的工程措施加以治理之故。

污水岸边排放可以通过明渠排放,这些明渠有些是人工衬砌的规则渠道,有些则可能完全是天然的河沟。在污水排往单向河流的情形,明渠岸边排放形成的近区污水场如图 1.1(a)所示。岸边排放也可以是通过暗渠或管道从水下潜没排放。在排往单向河流的情形,潜没排放所形成的近区污水场如图 1.1(b)所示。如果污水出口流速 u_0 与环境水体流速 U 之比较小(如 $u_0/U < 1$),污水场则会附着河岸边壁。如果污水排往具有往复流的潮汐河流、河口或海湾,则污水场就要复杂得多。在污水排往静水(如湖泊)的情况下,所形成的表面或潜没污水场则如图 1.1(c)所示。

二、污水海洋处置

1. 污水海洋放流系统

污水海洋处置是污水离岸排放的一种典型方式,它是通过规范的工程措施将污水送至离岸较远的水域排放,目的是利用海洋的巨大水体(或环境容量)吸纳和消化所排出的污染物,以取得必要的水质目标和保护近岸水域。因此,正确利用的污水海洋处置措施是一项环境保护工程技术。

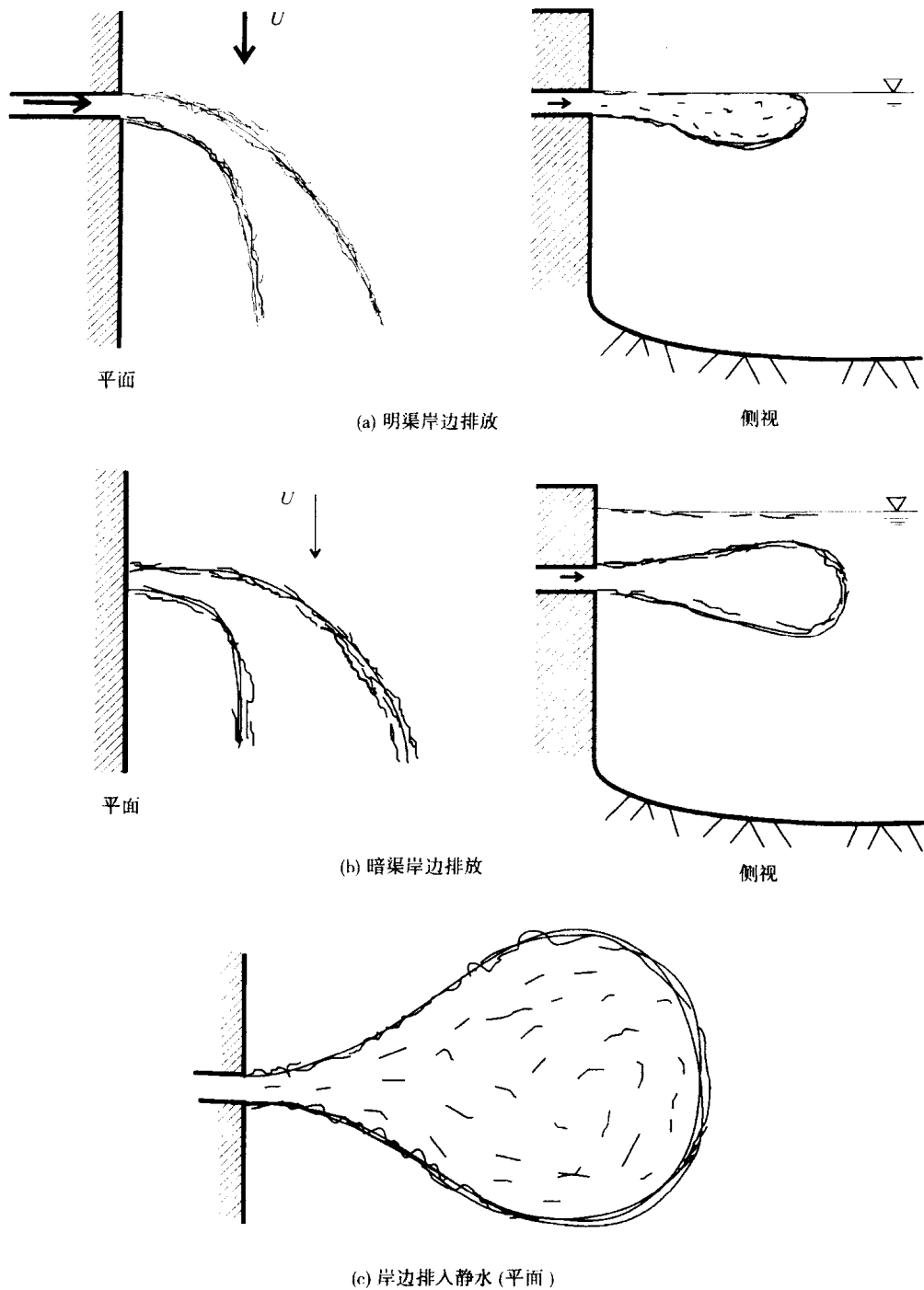
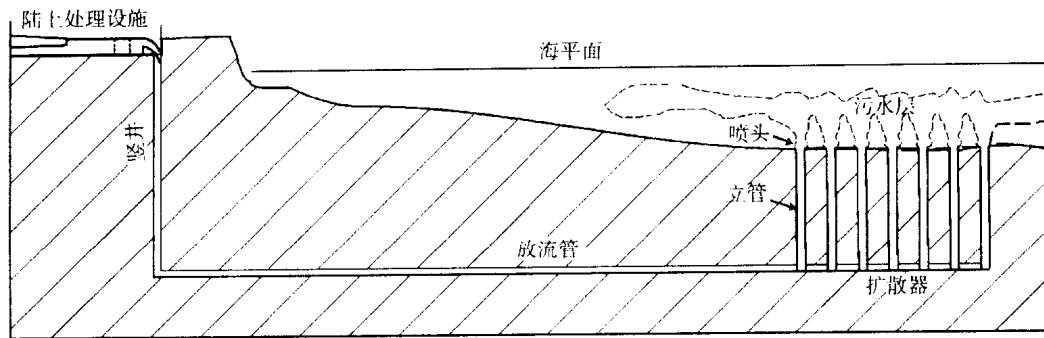
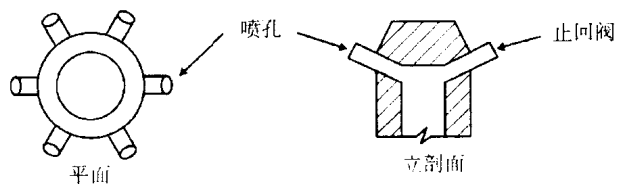


图 1.1 污水岸边排放形成的近区污水场

进行海洋处置的污水通常先在陆地上经过一定的处理,然后送入放流系统。大型污水海洋放流系统如图 1.2 所示。放流系统由放流管和扩散器组成。放流管前端的垂直部分称为竖井。连接于放流管末端的扩散器设有多根立管(或称竖管)。在立管露出海床面



(a) 放流系统



(b) 一种形式的喷头

图 1.2 大型污水海洋放流系统

的部分往往装上一个喷头,喷头周围再设置若干个与水平面成一定夹角的喷孔(如图 1.2 (b))。试验表面,从稀释扩散的效果看,同一喷头上的喷孔数以不多于 6 个为好^[1]。污水就这样从陆上污水处理设施经放流管送到扩散器,再经由立管和喷口从海底分散排入受纳水体中。污水放流系统或在海床中遁构而成,或在岩层中开凿隧道而成,其中放流管直径最大者可达 7m,长度达 15km^[2]。

较小型的放流管则可能用顶管法或开挖法埋设于较浅的海床里,甚至直接铺设在床面上(如图 1.3 所示)。铺设于床面的放流系统只在放流管的末端开一系列喷孔作为扩散

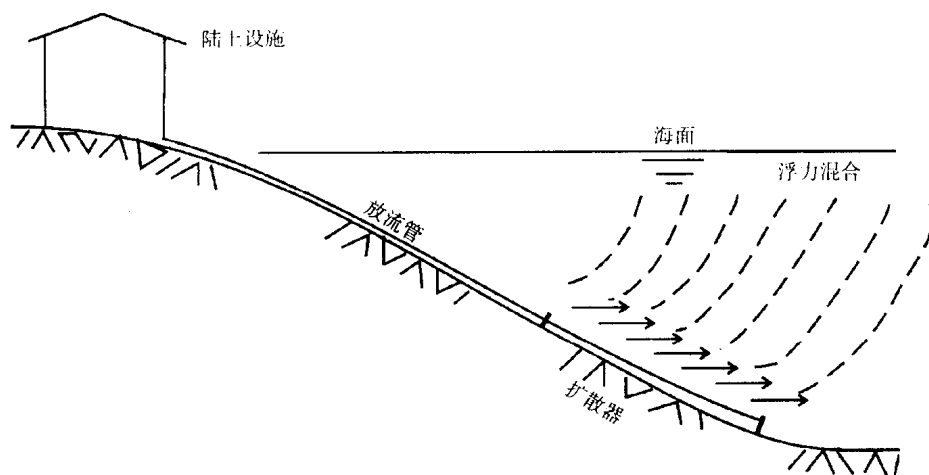


图 1.3 铺设于海床面上的放流系统

器。最简单的放流系统只在末端设一个喷孔。就一个喷孔而言,污水从喷孔排出后在流速可忽略的海水中形成的近区污水场如图 1.4 所示,其中图 1.4(a)为海水不分层的情形,图 1.4(b)为海水分层的情形。若海水流速很显著,则情形有所不同。若多个立管同时排放且排出的污水离出口不远就相互叠加,就会形成所谓线源排放的情形。

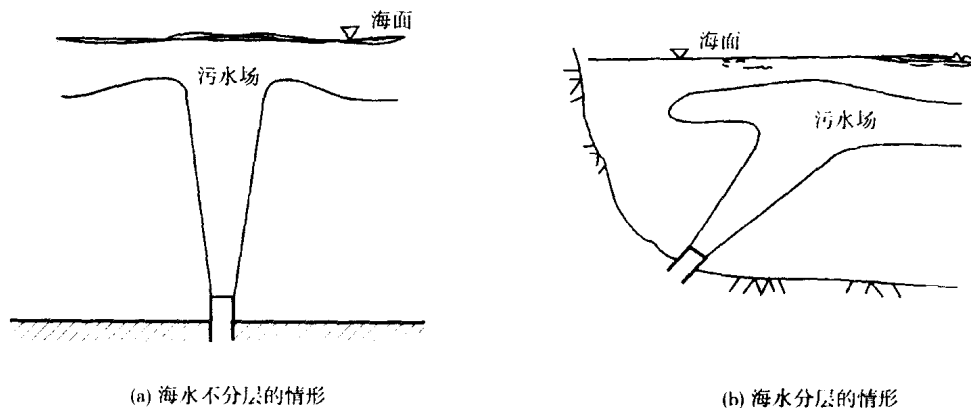


图 1.4 污水排入海洋中形成的污水场

将污水放流系统设于有潮汐往复流但含盐度很低的河口甚至完全的单向河流里,虽不能算作污水海洋处置工程,但却是一种在淡水水域的污水离岸排放工程,其水力学问题与上面介绍的排放方式有些是类似的。

2. 污水海洋处置与陆上处理比较

污水海洋处置工程在国内外得到广泛采用。英国最早于 19 世纪末即采用污水海洋处置工程,这一传统也深刻地影响到了香港的排污格局。美国和加拿大从 20 世纪三四十年代起亦开始大量采用污水海洋处置工程,目前美国的东海岸有污水海洋处置工程 250 多处。澳大利亚、新西兰、南非、土耳其、意大利、北欧与西欧及西非的沿海国家及南美的墨西哥、智利、巴西等及我国的台湾省自 20 世纪 80 年代起均开始采用污水海洋处置工程。至 20 世纪末,世界上在建的最大污水海洋处置工程要数美国的波士顿污水海洋处置工程,其规划日均排放量约为 $350 \times 10^4 \text{ m}^3$;我国香港地区规划的污水海洋处置工程,日均排放量也达 $250 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

我国自 20 世纪 80 年代末开始较多地采用污水海洋处置工程。据不完全统计,至 2000 年我国已建成投入运行或在建的污水海洋处置工程和排江工程有 13 个,设计规划中的有近 26 个。我国海岸线绵延万里,沿海发达地区众多,利用污水海洋处置技术不可避免地会成为一种必然的选择。这里有一个人们很关注的重要问题:为什么要将污水进行海洋处置?为什么不在陆上进行深度处理了事?污水海洋处置有什么好处?污水做初步处理离岸排放与陆上做深度处置相比较,两者各有优缺点。可以从环境、经济、社会三个方面做一简单讨论。

首先,从环境上考虑。国外生活污水和国内城市污水的组分统计结果列表于 1.1 中。污水在陆上处理后岸边排放仍会在岸边形成一个污染区,简单处理离岸排放则会在离岸

形成一个污染区,如图 1.5 所示。若以原始污水中 BOD_5 和 SS 为中等浓度为例,国外关于污水深度处理后和海洋处置后的 BOD_5 和 SS 浓度变化的统计研究结果列于表 1.2 中^[3]。再考虑 BOD_5 、SS、氨氮、大肠菌群及其在原始污水中的浓度范围,污水处理和海洋处置后的浓度变化统计研究结果示于图 1.6 中,相关的名词定义在稍后的文中有具体的说明。由表 1.2 和图 1.6 可以看出,即使经过二级处理乃至高级处置,大肠菌群浓度似乎很难满足欧共体的海水浴场水质标准(见表 1.3),而污水海洋处置则不然。这一研究结果似乎倾向于支持污水海洋处置比陆上深度处理环境效果更好。需要指出的是,在表 1.2(a)和图 1.6(a)中,并未考虑处理后的污水在岸边排放时也会有一定的初始稀释。另外,对各个具体的案例,两种污水治理方式的相对环境效果应该是各不相同的。

表 1.1 国外生活污水和国内城市污水主要水质指标($mg \cdot L^{-1}$)

组 分	浓 度			国内(中值)
	高	中	低	
总固体	1 200	720	350	
溶解性固体	850	500	250	
悬浮性固体	350	220	100	400
可沉降固体/ $mL \cdot L^{-1}$	20	10	5	
$BOD_5/20^{\circ}C$	400	220	110	300
总氮(以 N 计)	85	40	20	40
有机氮	35	15	8	
氨氮	50	25	12	25
总磷(以 P 计)	15	8	4	8
有机磷	5	3	1	0.5
无机磷	10	5	3	5
油脂				100
矿物油类				20
挥发酚				1.0
COD_{Cr}				500
TOC				160

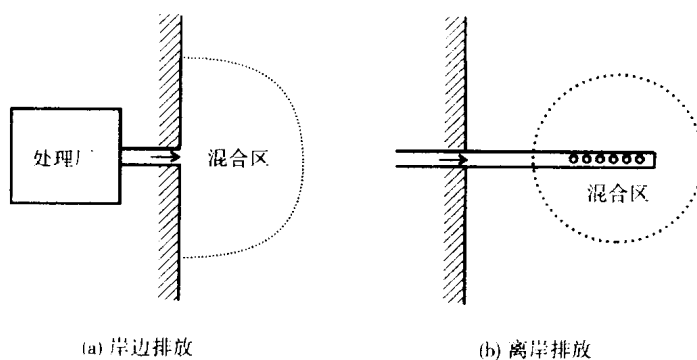


图 1.5 岸边排放与离岸排放比较

表 1.2(a) 国外典型污水处理厂主要污染物去除效果

项目	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	总大肠菌群/(个·100mL ⁻¹)
原污水	220	220	1×10^8
一级沉淀后	200	90	5×10^6
二级处理后	30	30	4×10^6
三级处理后	12~15	12~15	2×10^6
二级处理后加氯消毒			1×10^6

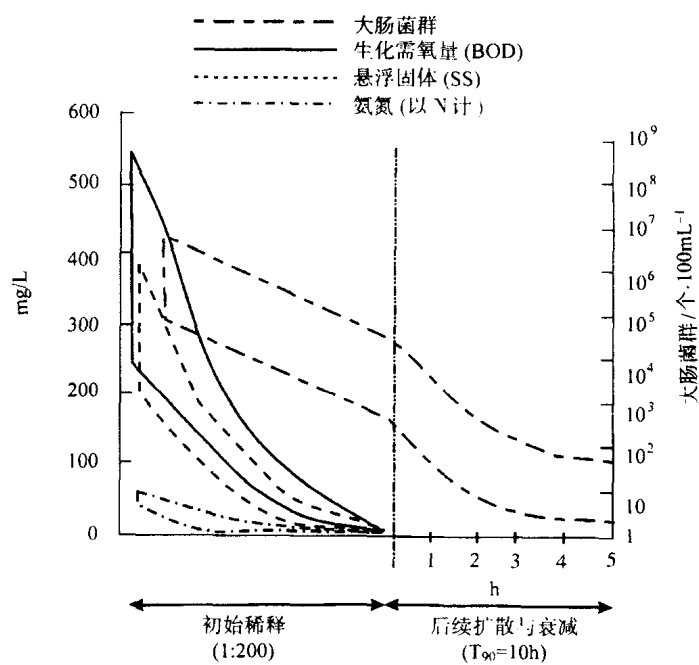
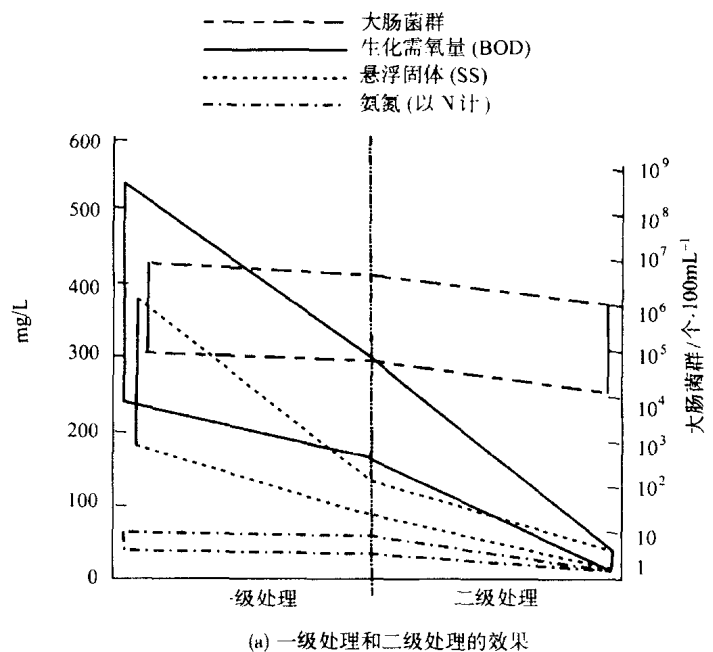


图 1.6 陆上处理与海洋处置效果之比较

表 1.2(b) 国外海洋放流污染物浓度变化统计结果

项目	BOD ₅ /mg·L ⁻¹	SS/mg·L ⁻¹	总大肠菌群/个·100mL ⁻¹
原污水	220	220	1×10 ⁸
陆上简易格栅	220	220	
典型动量稀释后	12	13	5×10 ⁸
典型浮力稀释后	增量为 1.5	增量为 1	5×10 ⁵
6h 进一步扩散和自然作用	难于检测	难于检测	500

表 1.3 欧共体海水浴场细菌标准

总大肠菌(每 100mL)	500(80)	100 000(95)
粪大肠菌(每 100mL)	100(80)	2 000(95)
粪链球菌(每 100mL)	100(90)	-
Salmonellae(每 1L)	-	0(95)
肠病毒(Enteroviruses)(每 10L)	-	0(95)

注：括号中数字表示不超标样品保证率

同样,污水陆上深度处理和海洋处置的经济比较对不同的具体案例也会有不同的结论,国外也有相关的分析研究(见文献[4])。如果考虑二级处理与一级处理之间的费用增量,根据国外的资料统计结果,以一污水处理设施服务人口为 20 万为例,若采用一级处理再加长度不超过 10km 的放流管进行海洋处置会比陆上二级处理岸边排放来得经济。

最后,从社会的角度考察。人们从直觉上更容易接受污水经过深度处理再排放,因此污水海洋处置工程常常遭到一些人的反对。

还可从多个具体方面对污水陆上处理和海洋处置进行比较,现将两者各自的优点列于表 1.4 中。就污水海洋处置自身而言,其有优点也有缺点,现列于表 1.5 中,不再详细讨论。

表 1.4 污水陆上处理与海洋处置优点比较

指 标	最佳选择	
	陆上处理	海洋处置
处理方式在原则上的公众可接受度	✓	
满足规定的标准	✓	✓
最小能耗		✓
最佳运行可靠性		✓
对公众健康的安全性	✓	✓
最小景观影响		✓
最佳臭味控制		✓
最佳噪声控制		✓
处理设施对市区(郊)干扰最小		✓
土地占用少		✓
对动植物群体影响最小	✓	✓

表 1.5 用长放流管将污水进行海洋处置的优缺点

优 点	缺 点
1. 提供完全的处置和有效的净化而不附带任何麻烦 2. 可以选址在高度适宜人居的区域而不会引起景观和气味问题 3. 可减少建设投资 4. 所需运转费用低 5. 占用土地较少 6. 运转所需人力较少 7. 能耗低 8. 维护简单 9. 不会因原污水被事故性毒化而危害处理过程 10. 没有污泥处置问题	1. 放流系统建造可能比较困难 2. 系统结构一旦被破坏很难修复 3. 对航运和渔业有潜在的不利影响 4. 不大容易依污水量的逐渐增长而分阶段建设 5. 对有毒物质的非法排放更难监控 6. 可导致潜在的淡水资源损失 7. 建造前的勘测工作量更大 8. 会遇到环保主义者和其他压力团体的强烈反对

总结以上的讨论,可以将结论归纳如下:是否要将污水离岸排放完全取决于环境要求 and 经济技术可行性。如果对一污水只需做适当处理岸边排放,也能满足环境要求,自然不必进行离岸排放;若即使进行了深度处理,岸边排放仍不能满足环境要求,则可能还需要加上离岸排放,或改为初步处理离岸排放,美国就有不少这样的例子。因此,对于已经经过深度处理的污水也可能有必要进行海洋处置,以进一步改善近岸水质;对于经初步处理的污水做海洋处置,则由于海洋处置能减低陆上的处理程度,在取得同样甚至更好的环境效果的情况下,比陆上深度处理岸边排放费用更省。但关键的问题是,污水海洋处置的选址要恰当,选址的原则是既不使建设运行费用过于昂贵,又要注意排放点和受纳水域的稀释扩散条件良好,以保证污水排放不造成环境污染。这就是需要用本书稍后各章节介绍的水力学方法帮助判断和解决的问题。

三、污水排放与射流

污水从排放口以一定的流速排入环境水体在排放口附近所形成的流动是为射流,无论污水是从岸边排放亦或通过放流系统离岸排放在这一点上是共同的,如图 1.1 和图 1.4 所示。不像管道流或明渠流,其边界全部或大部分被固体所限制,射流的特点是其边界均为流体。这一特别之处决定了对射流这一类流动要有特别的分析计算方法。

在污水海洋处置的情况,由于海水的密度通常比排出的污水密度大,污水从海底排出后就会在浮力的作用下而上升。在污水出口的初始动量作用相对较小,污水的上升流动主要是浮力作用的结果,这样的流动称为浮力羽流。分析浮力羽流的方法与分析射流的方法颇为类似。

若射流受出口动量和浮力共同控制,或先以出口动量控制为主而后以浮力控制为主,这样形成的流动称为浮力射流。事实上,污水海洋处置工程喷孔附近的流动绝大多数就是这种情况。从水底下排放电厂冷却水,由于排出的冷却水比受纳水体的温度高,由此存在的密度差也会使上述排放在排放口附近形成浮力射流或羽流。

由以上的讨论可知,对污水排放口近区污染物的稀释扩散进行分析计算需要直接依赖对射流、浮力射流和羽流的研究成果。