

水路绿色建设与生态修复系列丛书

近岸海域污染综合管控 与生境改善技术

李明昌 著

戴明新 丛书主编



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

水路绿色建设与生态修复系列丛书

近岸海域污染综合管控 与生境改善技术

李明昌 著
戴明新 丛书主编

图书在版编目(CIP)数据

近岸海域污染综合管控与生境改善技术 / 李明昌著

· 一 天津: 天津大学出版社, 2018. 10

(水路绿色建设与生态修复系列丛书 / 戴明新主编)

ISBN 978-7-5618-6257-5

I. ①近… II. ①李… III. ①近海-海洋污染-污染防治 IV. ①X55

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 229945 号

审图号:GS(2018)5009 号

出版发行	天津大学出版社
地 址	天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话	发行部:022-27403647
网 址	publish. tju. edu. cn
印 刷	北京虎彩文化传播有限公司
经 销	全国各地新华书店
开 本	185mm × 260mm
印 张	12. 5
字 数	306 千
版 次	2018 年 10 月第 1 版
印 次	2018 年 10 月第 1 次
定 价	35. 00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

本书编委会

主 任 戴明新 李明昌

副主任 周 斌 周 丰 赵英杰 邹 斌 彭士涛

编 委 焦润红 刘爱珍 杨细根 李广楼 顾 闻

前 言

面对日益严峻的海洋生态环境,如何科学有效地控制污染、防范污染突发事件、改善生境乃至打造海洋生态文明越来越受到政府部门、科研机构和广大人民群众的高度关注。水污染控制与治理是一项复杂的系统工程,基于污染排放总量控制和排污优化削减的污染排放综合管控是环境生态整治与改善的先决条件、重要基础与前提,是生态整治工程成功与否的决定性因素。

本书从污染系统控制的角度出发,通过生境质量可视化分析、入海污染源排污削减、污水深海排放优化设置和污染突发事件溯源与应急优化四大关键技术与方法的研发与应用,旨在为我国近岸海域污染综合管控与生境改善提供系统的、全面的、合理的全序列解决方案。全书共分6章,第一章为绪论,在简要介绍研究由来的基础上,分析了相关研究方法的进展,阐述了本书研究的目的、意义、主要研究内容与重点研究区域。第二章重点论述了本书四大关键技术的方法、模型与实施步骤。①生境质量可视化分析关键技术:建立了时间序列多尺度趋势分析、多元时间序列偏相关分析、平行坐标分析等生境质量可视化分析关键技术方法与模型,实现了环境生态现状的精细化、可视化分析。②入海污染源排污削减关键技术:以水动力学模型、污染物扩散数值模型、海域水质模型及数据驱动理论模型等多模型耦合模拟与分析,建立了入海污染源排污总量控制与优化削减关键技术方法体系,实现了多污染源共同作用下近岸海域排污削减的优化控制。③污水深海排放优化设置关键技术:建立了数据驱动理论模型、遗传算法等多种智能算法和水射流数值模型有机耦合的深海排放参数优化关键技术方法以及近场、远场相结合的排海口多目标优化设置关键技术方法,提升了污水深海处置效率,降低了污水深海处置能耗,促进了海域生态环境向好发展。④污染突发事件溯源与应急优化关键技术:建立了基于水质空间响应的固定源溯源关键技术方法和风场与流场逆向耦合的移动源溯源关键技术方法以及溯源搜索资源优化分配与最佳搜索路线确定关键技术方法,实现了海域污染事件的可靠溯源与最优资源分配及最佳路线确定。第三章应用生境质量可视化分析关键技术,开展了曹妃甸和天津近岸海域水质、底质沉积物与生态等方面的精细化、可视化分析,发现并揭示了曹妃甸和天津近岸海域的环境生态问题以及环境主要控制因素,并提升了环境现状分析的直观性。第四章应用入海污染源排污削减关键技术,以曹妃甸近岸海域(7个入海污染源)和连云港徐圩近岸海域(4个入海污染源)为例,结合区域环境质量目标,研究提出了多污染源共同作用下曹妃甸和徐圩近岸海域总量控制与削减的优化实施方案。第五章应用污水深海排放优化设置关键技术,通过曹妃甸循环经济示范区和天津南港工业区深海排海口的实例研究,为合理的污染物排放提供了优化方案,为近岸海域生境综合管控指明了未来污染排放的发展方向。第六章应用污染突发事件溯源与应急优化关键技术,开展了连云港徐圩海域和广西防城港海域污染突发事件的溯源、搜索资源分配及最佳路线确定研究,为综合管控中污染突

发事件应急提供了可靠的前期解决方案。

本书以我国近岸海域污染综合管控为主要研究对象,建立了多种数值方法与数学模型,研究成果对于生境质量状况分析、近岸海域排污总量控制与削减、污水深海排放和污染突发事件溯源及应急等多个方面研究均具有一定的指导和借鉴意义,可供环境科学相关领域的管理人员和科研人员参考阅读。研究工作得到了国家自然科学基金委自然科学基金资助项目“海域污染事件源搜索方法研究”(51209110)、大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室基金资助项目“重大涉海工程累积环境影响评价方法研究”(LP1108)、中央级公益性科研院所基本科研业务费项目“波流环境中射流实验与数值模拟及其在污水深海动态处置中的应用研究”(TKS100217)、“生态型海岸工程适宜生境空间重构技术研究”(TKS160227)等项目的资助与支持。

为本书提供支持的人员如下。

交通运输部天津水运工程科学研究院:张华庆、朱建华、张光玉、叶伟、赵俊杰、赵益栋、董世培、王楠、李亚娟、王宁、田明晶、高清军、朱宇新、王莹、徐楠、徐静等领导和海岸与海洋资源利用研究中心的全体同事。

大连理工大学:孙昭晨教授,梁书秀教授。

天津大学:尤学一教授。

连云港石化产业基地建设指挥部:吕松涛高级工程师。

唐山市曹妃甸工业区化学园区管理委员会:柳一鸣高级工程师。

天津市南港工业区开发有限公司:黄居兰高级工程师。

近岸海域污染综合管控涉及环境、生态、生物、经济等多个学科领域以及数据挖掘、环境数值模拟与预测、时间序列分析、优化等多个专业技术领域。本书以生境改善为目标,以污染综合管控为手段,研发了生境质量可视化分析、入海污染源排污削减、污水深海排放优化设置和污染突发事件溯源与应急四大关键技术,为近岸海域环境管理提供了技术支撑,但研究中仍存在一些不足之处和纰漏,有待于今后进一步地深入研究和逐步完善,也希望读者不吝赐教,以促进相关领域的研究。

李明昌

2018年3月16日

目 录

1	绪论	(1)
1.1	前言	(1)
1.2	相关研究方法进展	(2)
1.2.1	生境质量可视化分析技术研究进展	(2)
1.2.2	入海污染源排污削减研究进展	(2)
1.2.3	污水深海排放研究进展	(5)
1.2.4	海域污染突发事件研究进展	(8)
1.3	研究目的与意义	(9)
1.4	主要研究内容与重点研究区域	(10)
1.4.1	主要研究内容	(10)
1.4.2	重点研究区域	(10)
2	相关研究方法与模型	(15)
2.1	生境质量可视化分析方法	(15)
2.1.1	时间序列多尺度趋势分析方法	(15)
2.1.2	多元时间序列偏相关性分析方法	(16)
2.1.3	平行坐标分析方法	(16)
2.2	入海污染源排污削减研究方法	(17)
2.2.1	水动力学模型	(17)
2.2.2	污染物扩散数值模型	(19)
2.2.3	海域水质模型	(20)
2.2.4	最大允许排放量核算方法	(20)
2.2.5	入海污染源总量核算方法	(20)
2.2.6	入海污染源排污削减量核算方法	(20)
2.2.7	基于数据驱动理论的入海污染源排污削减研究方法	(21)
2.3	污水深海排放水射流数值模拟优化方法	(24)
2.3.1	射流数学模型	(25)
2.3.2	基于数据驱动模型神经网络算法的参数优化方法	(39)
2.3.3	基于遗传算法的多目标多参数优化方法	(40)
2.4	污染突发事件溯源与应急优化数值模拟方法	(49)
2.4.1	响应面理论	(49)
2.4.2	溢油模型	(49)
2.4.3	固定源污染事件寻源搜索方法与步骤	(51)

2.4.4	海域移动源溢油污染事件寻源搜索方法	(53)
2.4.5	海域污染事件寻源搜索资源优化分配与最佳搜索路线确定方法	(54)
3	近岸海域环境现状可视化分析	(56)
3.1	曹妃甸近岸工程海域环境生态质量现状演变趋势分析	(56)
3.1.1	固定点位的选择	(56)
3.1.2	主要污染因子固定点位时空变化趋势分析	(56)
3.1.3	主要污染因子最大值变化趋势分析	(63)
3.1.4	主要污染因子最小值变化趋势分析	(65)
3.1.5	主要污染因子平均值变化趋势分析	(67)
3.1.6	底质沉积物主要污染因子与海洋生态指标变化趋势分析	(69)
3.2	曹妃甸近岸工程海域重金属污染因子富集特性分析	(71)
3.2.1	研究目的	(71)
3.2.2	悬浮物变化趋势分析	(73)
3.2.3	重金属(铅)污染因子多相介质富集变化趋势特性分析	(73)
3.2.4	悬浮物、重金属铅多相富集相关性分析	(74)
3.3	近岸工程海域环境生态质量平行坐标可视化分析	(75)
3.3.1	曹妃甸海域分析	(75)
3.3.2	天津海域分析	(75)
4	入海污染源排污削减研究	(84)
4.1	曹妃甸近岸海域入海污染源排污削减研究	(84)
4.1.1	水质环境现状分析	(84)
4.1.2	入海污染源现状分析	(98)
4.1.3	入海污染源排污削减研究	(103)
4.1.4	入海污染源排污削减效果分析	(109)
4.2	连云港徐圩近岸海域入海污染源排污削减研究	(111)
4.2.1	近岸海域环境现状分析	(111)
4.2.2	入海污染源现状分析	(117)
4.2.3	入海污染源排污削减研究	(122)
4.2.4	入海污染源排污削减效果分析	(138)
5	污水深海排放射流优化数值模拟研究	(146)
5.1	污水深海排放水射流数值模拟研究	(147)
5.1.1	纯射流数值模拟与结果分析	(147)
5.1.2	浮力射流数值模拟与结果分析	(147)
5.2	基于数据驱动模型神经网络算法的射流参数优化	(148)
5.3	基于遗传算法的多目标多参数优化	(149)
5.4	污水深海排海口优化设置研究	(151)

5.4.1	曹妃甸排污口近场污染物扩散的三维数值模拟	(151)
5.4.2	曹妃甸循环经济示范区污水排海口优化设置研究	(160)
5.4.3	天津南港工业区污水深海排海口优化设置研究	(164)
6	污染突发事件溯源与应急优化数值模拟研究	(171)
6.1	基于水质区域空间响应的海域污染事件寻源搜索研究	(171)
6.2	海域移动源溢油污染事件寻源搜索研究	(173)
6.3	海域污染事件寻源搜索资源优化分配与最佳搜索路线确定	(175)
	参考文献	(177)

1 绪 论

1.1 前言

随着我国经济社会的高速发展,地表水和近岸海域水质富营养化现象等水环境问题日益突出;水污染事件频发,水污染现状仍十分严峻。2015 年 1 月 1 日开始实施的《中华人民共和国环境保护法》,首次引入了生态文明建设和可持续发展的立法理念,完善了环境监测、环境影响评价、跨行政区污染防治、排污许可管理、划定生态保护红线等环境管理制度;其后陆续出台的《关于加快推进生态文明建设的意见》《生态文明体制改革总体方案》《大气污染防治行动计划》《水污染防治行动计划》《土壤污染防治行动计划》等相关政策与文件,都为我国社会主义新时期建设指明了生态文明的发展方向。

2016 年《中国海洋环境状况公报》显示,我国近岸局部海域污染严重,海洋环境风险依然突出:主要污染海域为辽东湾、渤海湾、莱州湾、长江口、杭州湾、江苏沿岸、浙江沿岸、珠江口等近岸海域;主要污染物为无机氮、活性磷酸盐和石油类,其基本原因在于地表水系达标排放的比率相对较低(仅为 55%),致使 76% 的河口、海湾和珊瑚礁等生态系统处于亚健康和不健康状态。

水环境的连通性决定了水污染控制与治理是一项复杂的系统工程,其涉及地表水乃至黑臭水体的整治,近岸海域水环境生态整治与修复,污染排放综合管控等多个相互衔接又相互影响的研究领域。特别是基于污染排放总量控制和排污优化削减的污染排放综合管控领域,其为环境生态整治的先决条件、重要基础与前提,其优化方案的合理确定是生态整治工程成功与否的决定性因素。

因此,本研究从污染系统控制的角度,通过时间序列多尺度趋势分析、多元时间序列偏相关分析、平行坐标分析等生境质量可视化分析方法与模型的建立,开展近岸海域水质、底质沉积物与生态等方面的可视化分析,发现并揭示区域环境生态问题;建立了基于多模型耦合模拟与分析的入海污染源排污总量控制与优化削减方法体系,结合区域环境质量目标,提出多污染源总量控制与削减的优化实施方案;针对污染深海处置与排放工程领域,建立了多种智能算法与水射流数值模型有机耦合的深海排放参数优化方法以及近场、远场相结合的排海口多目标优化设置方法,为合理必要的污染物排放提供优化方案;针对近岸海域污染突发事件应急与溯源,分别建立了基于多模型相耦合的技术方法,为污染突发事件溯源与应急提供可靠方案。研究可为我国近岸海域生境综合管控提供系统的、全面的、合理的全序列解决方案。

为此,本研究包含以下 4 个方面的核心研究内容:

①生境质量可视化分析关键技术与方法;

- ②入海污染源排污削减关键技术与方法;
- ③污水深海排放优化设置关键技术与方法;
- ④污染突发事件溯源与应急优化关键技术与方法。

1.2 相关研究方法进展

本节针对研究中生境质量可视化分析、入海污染源排污削减、污水深海排放优化设置以及污染突发事件溯源与应急 4 个核心技术领域,收集、整理并总结分析其相关的研究进展。

1.2.1 生境质量可视化分析技术研究进展

掌握生境质量是分析、模拟、研究,乃至治理近岸海域生态环境污染的基础与关键。污染物质时空分布与变化趋势则是其对研究区域平面分布特征以及随时间变化的直观反映。污染物质平面分布就是采用一定的插值方法,将监测数据在观测区域范围内进行空间插值,并以等值线的形式予以呈现。目前的离散观测数据的插值方法有反距离加权法、克里金法、最小曲率法、改进的谢别德法、自然邻点法、最近邻点法、多元回归法、径向基函数法和移动平均法等多种方法。针对观测数据各自的特点,如数据量等,这些插值方法具有各自不同的应用范围。

时间序列趋势分析是描述某一现象历程状态、分析其变化规律以及预测其未来发展方向的重要技术手段,是其随时间变化的直观反映。截至目前,国内外学者已发展了多种趋势分析方法,在水环境、水生态、水文、气象灾害等诸多学科领域进行了大量的研究。

为了描述事物之间的关系,人们用变量来表示事物的数量特征,因此用于描述事物数量特征的变量之间自然也存在一定的关系。衡量事物之间即变量之间相关程度的强弱并用适当的统计指标表示出来的过程即为相关分析。相关性分析是揭示系统内各要素之间相互关系及系统演变规律的重要技术方法。目前,相关性分析的方法较多,如 SPSS 软件中的 Pearson、Spearman 和 Kendall 相关系数法等,还有时间序列分析方法以及基于小波变换的小波相关分析方法等。

平行坐标概念由法国数学家 Ocane 于 1885 年提出,其后由二维逐步发展为多维情况。平行坐标是信息可视化的一种重要技术,克服了传统的笛卡尔直角坐标系容易耗尽空间、无法表达三维以上数据的难题,现已在多元数据分析、可视化数据挖掘与最优化等多个研究领域得到了应用。

本研究结合海域环境生态现状数据的特点和相关分析研究工作的需求,建立了多尺度的趋势分析方法模型、偏相关性分析方法模型和平行坐标分析方法模型,提升环境现状分析的直观性和精细化程度,具有较强的研究价值和实际意义。

1.2.2 入海污染源排污削减研究进展

关于环境污染控制,国内外提出了多个概念,如环境容量、最大允许排污量等,本研究

从基础出发,对其进行相应的分析。

1.2.2.1 国外研究现状

最初的环境污染控制的思想是浓度控制,这会助长排污者低浓度大量排污的行为。20 世纪 60 年代末,日本为了改善水和大气环境质量状况,提出污染物排放总量控制的问题,即把一定区域内的大气或水体中的污染物总量控制在一定的允许限度内。这个“一定的允许限度”就是提出环境容量概念的依据,日本环境厅委托日本卫生工学小组提出《1975 年环境容量计量化调查研究》报告,环境容量的应用逐渐推广,成为污染物总量控制的理论基础。

欧美国家的学者较少使用环境容量这一术语,而是用同化容量、最大容许排污量和水体容许污染水平等概念。在欧美及其他国家,水环境容量理论的一个重要应用领域是为环境标准的制订提供经济技术可行性的理论依据。20 世纪 70—80 年代美国《国家环境政策法》中,把“最广泛地合理使用环境而不使其恶化”作为制订环境标准的原则之一;英国则最早直接应用稀释容量概念制订有机污染指标及悬浮物排放标准;前苏联主要依据满足生态和健康能够承受的污染物最高允许浓度直接作为水质标准,但在对这些标准进行可达性分析时也广泛采用了“容量”这一概念。

水环境容量研究涉及水环境科学的许多基本理论问题和水污染控制的许多实际问题。它的产生和发展在很大程度上取决于污染物在水环境中迁移、转化趋势研究的不断深入以及数学手段在水环境研究中应用程度的不断提高。水环境容量计算模式在理论上,从最初的质量平衡原理发展到现在的随机理论、灰色理论和模糊理论;在实际应用上,从一般河流水体发展到潮汐河网、湖泊(水库)和海湾等水体;在计算方法上,也从解析公式算法、模型试错法发展到系统最优化分析方法。

欧美国家一般将同化容量(最大允许纳污量)的计算和负荷分配在同一过程中进行,采用随机理论和系统优化相结合的方法进行研究。

Fujiwara 等把流量作为已知概率分布的随机变量,用概率约束模型对超标风险下的污染负荷分配进行研究;Ecker、Liebman 等、Loucks 等将流量等参数作为确定性变量进行水环境容量的研究;Revelle、Thomann 和 Sobel 用确定性方法把目标函数线性化后再用优化模型求排放量和削减量;Donald 和 Edward 用一阶不确定性分析方法将水质随机变量转化为等价确定性变量以计算排污量;Donald 和 Barbara 还基于水文、气象和污染负荷等不确定性因子的多重组合,对污染负荷进行计算和分配;Li 等在考虑海岸带横向混合不均匀性的基础上用优化模型确定各排污口在给定水质标准下的允许排放量;Ellis 采用嵌入概率约束条件的方式构建一个新的随机优化模型,在这个模型中河流的流量、起始断面的 BOD 和 DO、废水排放量、废水中的 BOD 和 DO、耗氧系数、复氧系数等也作为随机变量;Cardwell 和 Ellis 基于参数和模型的不确定性,对海域多点源的污染负荷分配进行研究。这些研究都取得了一定的效果。

1.2.2.2 国内研究现状

我国的水环境管理是以对污染源排污口排出的污染物进行浓度控制开始的,20 世纪 70 年代初,我国开始对污染物实行浓度控制,1973 年,国家颁发了“工业三废”排放试行标准,

20 世纪 80 年代后,国家依据“工业三废”排放标准,运用经济手段控制污染,提出了排污收费制度,主要是着眼于污染物排放浓度。随着环境管理工作的不断深入,人们愈来愈认识到,仅对污染源实行排放浓度控制是无法达到确保环境质量改善的目的;必须同时对污染物排放的总量进行控制,才能有效地控制和消除污染。因此,推行从单一排放口污染物浓度控制逐步过渡到污染物总量控制成为解决我国水环境问题的新方法。

宋国君从政策角度分析了总量控制和浓度控制的概念,对这两种环境管理方法体系进行了比较,并讨论了总量控制的实施战略和政策效果。据调查,国内实行污染物总量控制的方法和形式依据各地条件和各地问题的不同有所改变。各地都根据本地区的地理特点、规划布局、经济发展、环境状况等各种因素,分别采取了相应的控制方式。例如:广西壮族自治区近海海域水污染物总量控制,胶州湾营养盐、石油烃污染物环境容量计算,南通入海污染物总量控制,天津港水污染物排放总量控制,洋浦经济开发区污水排海总量控制,大辽河水系水污染物总量控制,大连湾污染排放总量控制,天津市大港石化工业发展规划区区域废水总量控制,大亚湾经济技术开发区污染物总量控制,珠海市水环境容量与水环境规划研究,珠江三角洲河网区域污染物总量控制,伶仃洋水环境容量研究。其中,有区域总量控制,有水系总量控制,有行业总量控制,也有特定污染物的总量控制。这些探索和试点经验,都对全国开展水环境总量控制和水环境容量的分析提供了宝贵的经验。

1.2.2.3 排污削减研究

尽管针对近岸海域环境污染控制,国内外学者提出了环境容量、同化容量、最大容许排放量等一系列的学术概念,但其核心应为满足一定经济发展与环境要求前提的入海污染源最大允许排放量与削减量的计算研究,对此学者们进行了大量的研究工作,如吴震昊以江苏如东海域北凌河口、小洋口闸、掘苴闸、东安闸 4 个排污口为研究对象,利用数学规划法,研究获得了满足目标函数和约束条件的污染物排放量和削减量;龚艳君等以潮流模拟为基础,通过受纳水体与排放源的响应关系,结合混合区,计算了威海湾各排污口的最大允许排放量与削减量;李红亮等依据《河北省水功能区划》,以 COD 和 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 为控制指标,在合理确定水质模型、水质目标、设计流量等相关参数的基础上,应用水质模型计算了水功能区水域纳污能力和应削减量;刘红刚等采用合作博弈论方法,以感潮河网区为例,考虑污染治理成本、排污策略与环境质量及其相互影响,建立了给定污染物总削减比例条件下的博弈模型;吕志峰等采用单纯数学模型手段,模拟并对比分析了胶州湾海域 8 个污染源削减排放前后的水环境质量情况;邓义祥等建立了基于线性响应场的污染物总量分配模型,通过 7 种权重系数方案,对渤海 TN 量进行了分配研究;张静等以 POM 模型和二维物质输运方程为基础,采用分担率法,计算了汕头港海域 6 个人海污染源的氮、磷营养盐环境容量,再结合水质保护目标,给出了具体的减排设计方案;王艳等采用自净过程积分方法,以江苏省海洋功能区划的水质要求为基础,计算了氮和磷营养盐的环境容量,并给出了入海削减率。

通过国内外的研究可以发现,对于海域环境的研究,已经从以往的浓度控制逐渐转移到总量控制和环境容量的分析上来,同时注重将总量控制与当地流域的水资源合理配置有机结合起来。水环境污染物排放总量控制不能孤立地存在或实施,必须同时结合其他的水利相关研究,这样区域水资源规划、水生态保护规划等工作目标才能真正得以实现。本研

究进行了数学模型模拟、最大允许排放量核算与入海污染源总量核算,并最终核算入海污染源排污削减量,其在科研和应用两方面都具有重要的意义。

1.2.3 污水深海排放研究进展

近年来,借助深海浪、潮和流极强的掺混输移能力,污水离岸深海排放成为一种新的最终处置方式,由于其具有较低的工程造价和运行费用,逐渐成为滨海地区解决城市水污染优先考虑的工程措施。国外一些国家的沿海城市已采用深海排放的方式处理城市污水,例如澳大利亚的悉尼市,其城市生活污水中,大约 80% 进行浅度处理后排放入深海,大约 20% 进行深度处理后排入内陆河流,以最低的成本获得最大的环境效益。国内上海、海南、辽宁和山东等地的沿海城市也有相应的工程范例。

污水深海处置的重要环节就是污水经过预处理后通过铺设在水下的排放管输送到离岸适当距离的一定水深处,利用安置在排放口的扩散器,充分利用受纳水体的自净能力使污水与周围环境水体迅速混合,在尽可能小的范围内高度稀释以提高污水的初始稀释效果,达到要求的排放标准。污水通常以射流的形式排放到江河湖海中,即排放流体从几何尺寸远小于受纳流体所占空间尺寸的喷口流入受纳流体并与之混合,在排放近区达到高度稀释。运动的环境水体会明显改变射流特性,而水流和波浪是环境水体运动最普遍也是最重要的两种形式。动水环境中的射流运动属湍流运动,系统开展动水环境中射流特性的基础性研究不仅可以加深对湍流的认识,而且能够为射流在生产实践中的应用提供更加完善的理论基础,为设计扩散器喷口角度、出流流速、喷口间距和喷口直径等参数提供科学依据。

1.2.3.1 试验方法研究进展

物理模型试验是进行射流特性研究的一种直观手段,试验中运用各种量测仪器对射流流场、浓度场等进行量测,并通过试验数据分析,获得并掌握射流的流场及浓度场分布特性。量测技术是物理模型试验的基础,测试技术的发展水平在很大程度上决定了紊动射流特性研究的发展,近年来随着流体测试技术的发展,先进精密的仪器和技术手段使得射流特性的研究不断走向深入。

射流物理模型试验研究中的测速仪器从最初的热线和热膜流速仪,发展到激光流速仪,乃至后来的粒子图像测速技术(PIV)和激光诱导荧光技术(LIF),高精度的试验仪器和试验手段大大提高了射流特性研究的水平。

在射流特性研究的初始阶段,研究者们使用热线和热膜流速仪进行了大量的射流试验研究,获得了宝贵的试验数据,并以此逐步建立了射流的物理概念和理论。如 Wagnanski 和 Fiedler 利用热线测速计测量了圆射流的紊动特性,获得了紊流雷诺应力横断面分布以及流速紊动强度横断面分布和沿程变化规律;Gutmark 等使用热线流速仪研究了多种条件下的射流运动特性与规律,取得了大量试验数据。

由于热线和热膜流速仪存在操作复杂、易损坏等缺点,给射流试验的深入研究带来了极大的不便。随后,一种新的测速仪器——激光流速仪被应用于射流试验的研究中。Kotsovinos 首次使用激光流速仪研究了二维垂直紊动浮射流的卷吸和掺混过程。Lam, Chan

和 Lam 分别利用激光流速仪对反向流动环境中不同流速比下紊动淹没圆射流的射流流场特性进行了研究,获得了流速断面分布、射流宽度和射流长度等重要特征参数。Ramaprian 和 Chandrasekhara 使用激光流速仪测量了平面羽流的时均和紊动特性。射流理论随着试验数据的大量取得也在逐步完善。但热线和激光流速仪均属于单点式测量,无法掌握射流的全流速场和浓度场,因此只能定性分析而无法精确定量分析,这就限制了射流理论的发展和紊流模型的建立。

随着激光技术、数字信号和数字图像处理技术、计算机技术和光学技术的不断发展,粒子图像测速技术(PIV)和激光诱导荧光技术(LIF)成为研究射流速度场和浓度场的强有力的新工具,再结合紊流模型和理论分析,较好地阐述了射流的发展与稀释过程,并建立了射流理论。Weisgraber 和 Liepmann 利用 DPIV 技术测量了不同出口雷诺数下圆射流紊流发展区内的紊动结构,获得了该区域内涡量的平均和瞬时分布特征、雷诺应力、轴线和横断面上紊动强度变化规律以及紊动动能等紊动特性。Haven 和 Kurosaka 采用 LIF 和 PIV 技术研究了横流射流出口的几何特性对近区流动特性的影响。Law 和 Wang 同样采用 LIF 和 PIV 技术研究了射流掺混过程的时均和紊动特性。Ryu 等利用 PIV 技术对波浪环境下水平射流的喷口轴线的速度衰减及射流扩展率进行了研究。国内学者也开展了大量的研究工作,姜国强等采用 PIV 技术研究了横流中紊动射流的水动力特性及旋涡结构;张明亮等在水垫塘试验模型淹没射流中应用 PIV 技术得到了流场的流态及等流函数线、涡量、湍动能等特征参数;张燕等使用 PIV 技术对横流冲击射流尾迹涡结构进行了试验研究;肖洋利用 LIF、PIV 测量系统对横向流动条件下多孔水平动量射流的浓度场和速度场进行了系统测量。

1.2.3.2 数学模型方法研究进展

随着计算机技术的不断发展和射流理论的逐步完善,射流模型被学者们建立起来,并开展了大量的理论与工程实践研究,其方法主要包括量纲分析法、动量积分法和微分方程法。

1. 量纲分析法

国内外较常见的量纲分析方法有两种:一种是采用基本特征参量来做量纲分析,即采用特征长度、特征流速和流体密度为基本参数,从影响扩散器射流近区掺混稀释的因素出发,分析近区内的流动特性参数,Anthony 和 Willmarth 利用该方法对自由水面下圆射流的紊动特性进行了研究分析;另一种不用基本量纲来进行分析,而采用相对于单位质量的比质量通量、比动量通量和比浮力通量作为基本参量来做量纲分析,将射流的各种特性变量表示为这三个参数的出射量、出射角和坐标的函数,许多学者利用该方法研究了射流的流动规律和传播、掺混特性,得到了大量有意义的结果。

2. 动量积分法

动量积分法较微分方程法简单,是工程上求解射流问题最常用的方法,其思想是建立在流动自相似假定的基础上,根据流体运动的质量守恒、动量守恒和能量守恒,对流体运动的三大微分方程进行积分,从而将偏微分方程转变为常微分方程,并以边界条件使方程封闭,从而结合定解条件来预报射流的流动特性,如流速和浓度的分布规律。

应用该方法,学者们开展了大量的研究工作,取得了丰富的研究成果。Lee 和 Seo 使用

平流热子(Advection Thermal)的试验数据和单个水下污水排放器的现场数据论证了高斯—涡积分模型;Wang 和 Law 基于试验数据发展了一个新的二阶积分模型,并应用于紊动圆形射流的研究;Mukhtasor 等回顾了先前的积分模型,提出了一个新的模型方法,该模型基于结合附加的卷吸假设和非线性的衰退模型的长度尺度分析,研究结果显示该方法较以前的模型更加合理。动量积分法以许多自相似假定为基础,其中有些相似性假设尚需进一步的完善。

3. 微分方程法

动量积分法事先要假定流动物理量的断面分布,而这些恰恰是需要求解得出的结论,因此这种方法缺少预报性,其应用也受到很大限制。微分方程法则不受这些限制,它是从描述流动的基本方程出发,应用紊流模型构成封闭的偏微分方程组,结合所解流动的定解条件,利用数值方法对数学模型进行离散,从而得出所解流动的基本规律。对紊动射流应用微分方程求解的关键是方程的封闭问题,必须增加雷诺应力项使方程组封闭且有唯一解,由此需对雷诺应力采用适当的紊流模型。代数应力模型以其能充分考虑雷诺应力各分量的不同发展,正确地计及复杂水流中各项雷诺应力输运,且计算量也不比紊流模型大的优点逐步被研究者用于紊动射流的研究中。金忠青利用该模型对二维紊动淹没射流进行了模拟计算与求解,将计算结果与实测结果比较表明:该模型能够准确模拟射流涡旋区的非边界层性的复杂流态和紊动动能的分布;杨志峰等对潮汐环境中垂向湍射流流场进行了数值模拟;槐文信和李炜利用紊流模型结合混合有限分析法对静止分层环境中圆形浮力射流全场特性进行了模拟,其结果和试验资料基本吻合,此外还对不同流速比下横流中单圆孔紊动射流流动特性进行了模拟计算,其结果与试验资料吻合较好;曾玉红和槐文信对横流中圆形垂直浮力射流进行了数值模拟,对射流流动结构、分叉现象、射流轨迹线等进行了预测;Chang 和 Chen 计算了二维平板、不可压缩等条件下,横向紊动射流的速度场、温度场和湍动能,研究发现射流同时从两个平板上对称入射时,水平方向的速度分量和湍动能有所增加。但由于紊流模型存在各向同性的假定,而紊动射流具有强烈的各向异性,这对数值计算结果的精度造成了一定的影响。张长高利用运动学的观点,根据紊流的脉动性质,建立了各向异性的新紊流模型;袁丽蓉则利用该模型对波流环境中的垂向紊动射流进行了数值模拟研究。

此外,随着计算机技术的发展,大涡模拟方法和直接数值模拟方法也在紊动射流的研究中得到应用,Dai 和 Wang 利用大涡模拟方法研究了波浪环境中的二维垂向射流,Hahn 和 Choi 利用直接数值模拟方法观察了射流旋涡的发展过程。

1.2.3.3 污水深海优化排放研究进展

针对污水深海排放工程,学者们已开展了大量的射流特性试验与数值模拟研究。徐高田等采用物理模型试验研究了射流喷角对稀释度的影响,结果表明喷口应尽可能垂直于环境水流,以提高与周围水体的接触面积,使射流水体能够得到充分的稀释扩散。周丰等建立数值模型,以涡心点和分离点与射流喷角的关系,论证了射流喷角为 90° 时回流区面积最大,最有利于射流水体与环境水体的掺混。同时,学者们也开展了大量的实际工程设计研究工作。韦鹤平等用物理模型进行扩散器工程设计参数的优化研究,分析了不同设计参数

对稀释效果的影响,提出了提高近区稀释度、防止污水冒顶、避免泥沙入侵的最佳可行扩散器工程参数。王文喜等对烟台市污水深海排放工程水工结构设计方案和工程工艺进行了研究。王显等从环境容量角度对威海市污水深海排放工程进行了方案比选研究。张华昌等通过物理模型试验对某滨海城市的污水深海排放工程开展了整体与断面模型试验。

射流喷角和射流比等深海排放设计参数是影响回流区域尺度和射流水体与环境水体掺混强度的重要参量,尽管已有部分学者开展了射流喷角对射流特性的影响研究,但污水深海排放工程中存在大量的工程参数有待于进一步的优化设计,以达到节约污水输送能源支出和提高污水与环境水体掺混效率的目的,但截至目前未见该方面的文献报道。本研究建立多种智能算法和水射流数值模型有机耦合的深海排放参数优化方法以及近场、远场相结合的排海口多目标优化设置方法,为合理、必要的污染物排放提供优化方案,具有较强的实际意义与研究价值。

1.2.4 海域污染突发事件研究进展

随着海洋经济的迅速发展和海洋开发规模的不断加大,我国海域环境问题日益突出,陆源污染突发事件和海上溢油重大污染事件频发。据不完全统计,近10年来仅渤海因污染事故造成的海洋经济损失达1 000多亿元,对海洋资源、生态环境和人体健康的长期影响更是难以估算。因此,开展海域污染事件的源搜索、资源分配方法及搜索工作模式的研究,对于合理配置搜索监测资源,提高应急响应速度,及时查找并切断事故源头,保护海洋环境和促进“节能减排”工作的有效开展极具现实意义。

海域污染事件发生后,如何准确定位污染源是解决污染事件的关键,对于防止进一步的污染有着十分重要的意义和作用。除重大的突发性污染事故外,对类似于无主漂油等为数众多的海域污染事件则不易察觉和无法寻源,可能存在的暗排和超标排放所造成的污染事件也同样具有较大的寻源难度。目前,组织人力开展陆源和海源逐一排查的源搜索方式不具备科学性,不能保证污染事件应急处置的高效性;尽管针对溢油污染的油指纹库在我国已初步建立,但仍不完备,风化等研究仍需提高,同时油指纹库也不能完全保证突发污染事件源头的精确定位;污染事件协调与指挥调度影响着应急工作的快速反应,科学合理的搜索资源分配方案和最佳的搜索路线是及早发现事件源的基础和保证。但污染事件的源搜索、资源分配与最佳搜索路线技术缺乏理论支持,导致污染事件寻源调查周期长,耗费大量的人力和物力。对于多污染源共同作用的特定海域,以海域单元污染程度与污染源项之间的非线性关系为基础,研究海域污染事件的源搜索技术、最优化的搜索资源分配方法和最佳的搜索路线确定方法,对于水污染事件的寻源、治理与解决是十分必要的。

最优搜索理论源于第二次世界大战期间的反潜军事运筹学研究,经过几十年的深入发展,已在犯罪学、侦察学、生物学、经济学、环境保护、工业自动化等多个非军事领域有了广泛的应用。云模型是在概率与模糊数学的理论基础之上,通过特定算法所形成的定性概念与定量数值之间的不确定性转换模型,该模型反映了随机性和模糊性之间的关联,构成了定性和定量间的相互映射,现已被应用于系统评测、算法改进、决策支持、智能控制、数据挖