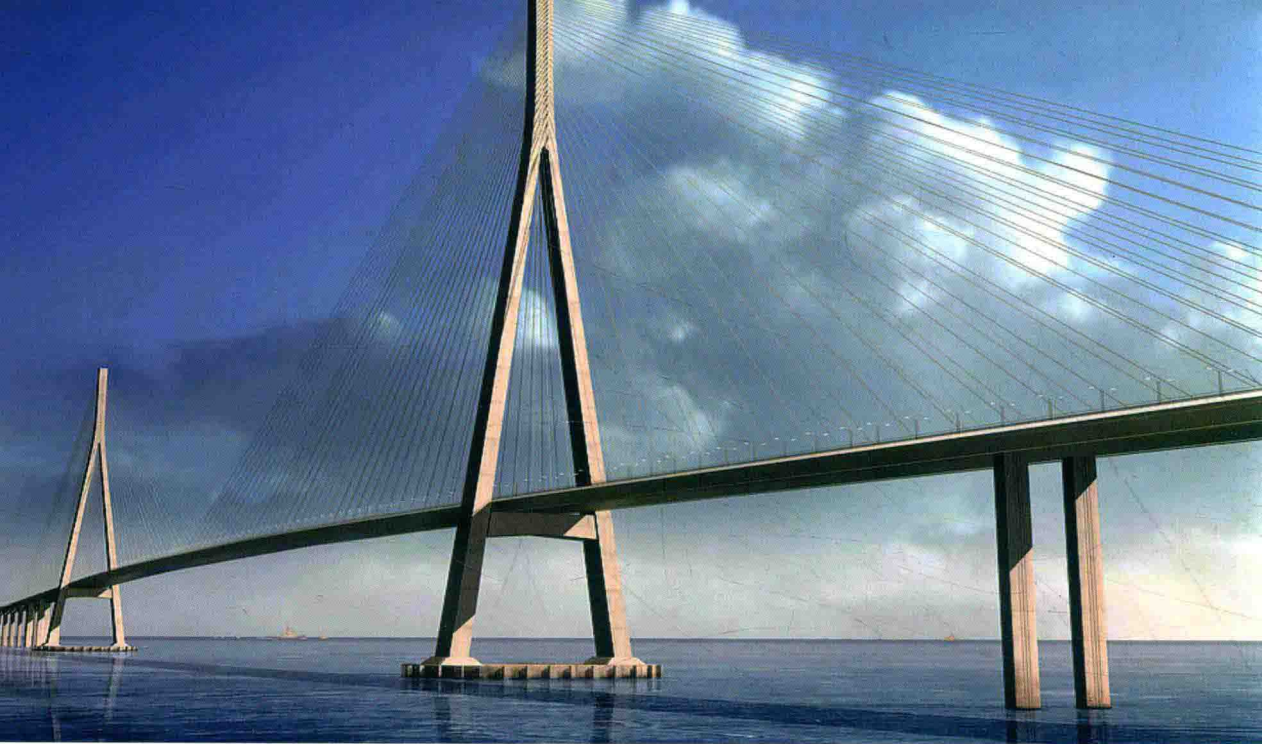




近海与湖泊水动力及物质运输的 数值模拟方法和应用

姜恒志 崔 雷 编著

大连海事大学出版社

近海与湖泊水动力及物质运输的 数值模拟方法和应用

姜恒志 崔 雷 编著

大连海事大学出版社

©姜恒志 崔雷 2017

图书在版编目 (CIP) 数据

近海与湖泊水动力及物质输运的数值模拟方法和应用 /
姜恒志, 崔雷编著. — 大连 : 大连海事大学出版社,
2017. 2

ISBN 978-7-5632-3442-4

I. ①近… II. ①姜… ②崔… III. ①近海—海洋动
力学—数值模拟②湖泊—水动力学—数值模拟 IV.
①P731.2②P343.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 024377 号

大连海事大学出版社出版

地址: 大连市凌海路 1 号 邮编: 116026 电话: 0411-84728394 传真: 0411-84727996

<http://www.dmupress.com>

E-mail: cbs@dmupress.com

大连住友彩色印刷有限公司印装

大连海事大学出版社发行

2017 年 2 月第 1 版

2017 年 2 月第 1 次印刷

幅面尺寸: 185 mm×260 mm

印张: 8.75

字数: 215 千

印数: 1~800 册

出版人: 徐华东

责任编辑: 董玉洁

责任校对: 孙延彬 阮琳涵

封面设计: 王 艳

版式设计: 解瑶瑶

ISBN 978-7-5632-3442-4

定价: 18.00 元

前 言

随着计算数学理论和计算机技术的进步,数值模拟方法得到了飞速的发展,水动力泥沙模型得到越来越多的认可,并在海洋、河流、湖泊及近海海岸工程中得到了广泛的应用,成功地解决了大量的工程实际问题。风、潮汐、潮流及波浪的作用在近海区域占有相当重要的地位,通过对其的数值模拟不仅可以了解近岸浅水海域的水文特征,而且可以进一步认识湖泊、海湾及临近海域的环流结构。本书特别关注风对湖泊环流的影响,潮流、波浪对海洋环流、波浪变形及泥沙传输的影响。

在本书内容的选取上,作者特别关注当前一些新的研究方法、数值模拟新技术进展以及当前研究较少而又亟须解决的问题。本书共分9章,第1章介绍了三维水动力模型、近海环流、河口盐水入侵、波浪模型及波浪潮流泥沙耦合模型方面的研究进展。第2章详细介绍了本书所采用的模型相关水动力、波浪及泥沙数学模型的公式及其推导。第3章建立了渤海海域的三维斜压模型,对渤海的水动力特性进行了研究。第4章在采用第3章建立的渤海三维斜压模型的基础上,启用模型的Lagrangian粒子追踪模块,并对风和海表热通量、径流、潮等环流的影响因素进行数值试验,深入分析了不同因素对渤海冬夏季环流结构的影响。第5章建立了瓯江口海区的三维斜压模型,对该海区的水动力特性进行了研究。第6章建立了太湖区域三维水动力数学模型,运用该模型探讨了不同风场、湖底地形和吞吐流作用下的太湖流场的变化情况。第7章以QuikSCAT/NCEP混合风场数据为基础,使用前人提出的插值公式进行时间和空间插值,随后对渤海的风生浪进行了数值模拟。采用SWAN波浪模型模拟了太湖及瓯江口海区的波浪分布。第8章采用三维盐度数学模型,探讨了瓯江河口在六种不同径流、风速和潮流组合条件下的盐水入侵及其盐度分层情况。第9章实现了EFDC水动力模型和SWAN波浪模型的双向耦合,利用WCM波流模型计算波流共同作用下的底部切应力。在此基础上模拟了瓯江口海区的泥沙输移扩散。

编者师从大连理工大学沈永明教授攻读博士学位,在他的指导下,顺利完成了研究工作,而后在工作期间也做了大量延续性的研究。这些研究都是本书的基石,在此对沈老师表示衷心的感谢。

本书的部分内容受到国家自然科学基金项目(批准号:41376120和51579030)、大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目(批准号:LP1402和LP1501)、中国博士后科学基金面上资助项目(批准号:2015M581358)、国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室开放基金项目(批准号:201309)资助。

由于本书涉及的内容较多、观点较新，加之时间仓促，书中疏漏之处在所难免，恳请广大读者对本书提出宝贵的意见和建议。

编者
2016年9月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究的目的和意义	1
1.2 国内外研究概况	2
1.3 本书的主要工作	8
第 2 章 三维水动力、波浪及泥沙数学模型	10
2.1 三维水动力数学模型	10
2.2 波浪数学模型	23
2.3 泥沙数学模型	29
2.4 小结	33
第 3 章 渤海三维水动力数值模拟	34
3.1 模型设置	34
3.2 模型验证	37
3.3 小结	42
第 4 章 渤海冬、夏季环流数值模拟	43
4.1 渤海冬、夏季环流结构	43
4.2 冬、夏季环流的影响因素	46
4.3 小结	56
第 5 章 瓯江口海区三维水动力数值模拟	58
5.1 三维水动力数学模型	58
5.2 模型应用及其验证	58
5.3 小结	65
第 6 章 太湖流场数值模拟	67
6.1 太湖三维水动力数学模型	67
6.2 模型应用及其验证	68
6.3 风场、地形和吞吐流对太湖流场影响	70
6.4 小结	77

第 7 章 近海与湖泊波浪数值模拟.....79

7.1 SWAN 波浪模型.....79

7.2 模型应用及其验证79

7.3 小结.....94

第 8 章 瓯江口海水入侵数值模拟.....95

8.1 三维水流盐度数学模型95

8.2 模型参数的确定95

8.3 定解条件.....96

8.4 模型应用及其验证97

8.5 小结.....109

第 9 章 波流耦合作用下的泥沙数值模拟.....110

9.1 波流耦合数值模型描述110

9.2 数值模型验证及其应用115

9.3 小结.....119

参考文献.....121

第1章 绪论

1.1 研究的目的和意义

海洋是一个开放的大系统,它通过与陆地、大气以及底层沉积物进行物质和能量的交换来维持自身生态系统的平衡和繁衍。地球表面的 72%被海洋覆盖,海洋是全球生命保障系统的一个基本组成部分,是人类可持续发展所必需的能源、矿物、食物、淡水和重要金属的战略资源基地,也是人类巨大的资源宝库,更是环境的重要调节器。

陆海交汇地带的近岸区、河口区存在着复杂的水动力要素,在这些区域里,潮汐、淡水径流、波浪等各种动力因素共同作用,它们之间相互影响,构成本区域的复杂动力场系统,控制海岸河口区泥沙、污染物等的扩散输运。加上这些区域为人类活动比较密集频繁的区域,从而导致本区域生态环境脆弱。但是这些区域又是人类生活的重要集结地,并且从古至今都是经济发展的重要地点,如何对它进行合理的开发和利用是促进人类经济生活能否健康和谐发展的关键因素。了解该区域海流运动的过程,对掌握污染物质以及泥沙等入海后的输移转化规律,弄清污染物质和泥沙等在水体中的浓度分布及其变化,以及研究污染物和泥沙等对海洋生态环境的影响都具有十分重要的意义。由于近岸区的水深较浅,波浪影响比较明显,进行数值模拟时如果仅考虑潮流、径流作用下的动力场,所得的结果就不能很好地反映实际情况,将这种结果提供给实际工程做参考时,就会出现偏差,造成人力、财力、物力的浪费以及工程建成后当地环境的变化。在这种情况下考虑波流耦合作用对近岸区的水流模拟有着非常重要的实际意义。

河口是河流向海洋过渡地带,由于河流和海洋的动力条件不同以及它们各自含盐度的不同,在潮流、径流、波浪、科氏力和风等多种要素的作用下,当两者交汇的时候会使得密度较大的盐水沿着河底侵入河口,从而导致盐水的入侵。盐水入侵与河口海洋交汇处的水动力、泥沙的絮凝沉降等过程有密切的关系。由于盐水入侵,使得河口处的水动力条件以及含沙量都发生了一定程度的变化。流速发生变化之后,就会形成一些内部环流;而盐水的絮凝作用又使得河水及海水中的细颗粒泥沙发生絮凝沉降,从而进一步对河床产生较大的影响。为了防止盐水入侵进一步恶化,研究河口处的盐度输移规律就成为迫在眉睫的事情。河口盐水入侵涉及诸多学科,是一个综合性的研究课题。就目前来看,研究考虑多因素作用下河口处盐度的横向纵向以及垂向分布是研究河口盐水入侵的重点。

水环境的保护和治理是 21 世纪人类可持续发展战略的焦点问题之一,而这其中湖泊又是最重要的水资源之一,它是湖泊流域生态系统健康发展的物质基础,是国民经济可持续迅速发展的重要保障。随着社会的发展进步与人口的不断增长,大量农田排水、工业废水和生活污水被排放到湖泊,造成湖泊富营养化等一系列的环境问题,不但给沿湖流域发展水产养殖、灌溉、旅游等第三产业带来重大经济损失,而且还会直接影响到淡水资源的调节与利用,给

人类活动和身心健康造成极大的损害。因此,湖泊水环境的规划、治理和保护已经成为我国亟待解决的重大环境问题之一。

就物理模型而言,主要存在着比尺效应,周期长,投资大,可移植性差,很难完全适应多因素、多方案、大范围的工程规划问题。而数值模型正好可以克服物理模型的这些缺点。近几十年来,随着计算机及计算科学技术的发展,数值模型被越来越广泛地应用于河口、近岸、海洋以及内陆水系的数值模拟。用数值模型来解决湖泊、河流、河口、海岸、大洋以及多因素(如风、浪、流、潮汐、含盐度、泥沙)等之间的相互作用及其在海岸工程中的应用已经越来越广泛地受到人们的重视。数学模型不仅能够很好地模拟所研究区域的水流运动形态以及各种物质之间的输移转化,而且还可预测未来任意时间该区域的水动力及其水质变化,为决策者们提供了一个很好的指导工具。

1.2 国内外研究概况

1.2.1 三维水动力模型研究进展

平面二维海洋水动力模型,其采用的是垂向平均的方式,这样就不能给出垂向流速的分布,不能反映出水流垂直方向上的运动过程。而河口、海岸水流运动具有明显的三维特性,精细的模拟应建立三维水动力学数学模型。随着计算机和计算机科学技术的发展,三维模型被越来越多地应用到河口、海岸及近海工程中。因此,发展和完善河口、海岸三维潮流数学模型就显得势在必行。受计算机容量和性能的限制,对大尺度潮流场进行精细的三维数值模拟尚有一定困难。通过尺度分析发现,近海潮流运动的水平运动尺度远大于垂向运动尺度,因此可忽略垂向加速度,则垂向动量方程退化为静压方程。最早的三维环流模型出现在 20 世纪 60 年代,它是建立在刚盖假定的基础上,没有考虑表面的重力波。在潮流模型的建立方面,Leendertse 等^[1]在垂向上采用固定分层的方法,即将计算水域划分为固定的多层,在此基础上建立了海湾三维潮流和盐度模型。Kim 和 Lee^[2]也采用固定分层的方法建立了三维潮流、盐度模型;Shankar 等^[3]采用交错网格,模拟了风场、密度流及潮流流动;Chao 等^[4]计算了海岸潮流运动。为了更好地拟合复杂海底地形以及提高模拟的精度,许多学者将 Philips^[5]提出的 σ 坐标变换应用到河口、海岸的三维数值模拟中,得到自由表面和床面精确满足边界条件的计算域。由于天然流域岸线复杂,曲线坐标能较好地拟合岸线,Sheng^[6]采用 σ 坐标,建立了一般曲线坐标下的三维水动力学模型(CH3D)。Wang^[7]用普遍张量的形式表示三维水动力学模型的控制方程,成功反演了美国 Galveston 海湾的三维流场及其盐度分布。以 Princeton 大学 Mellor 和 Blumberg^[8,9]为首的海洋动力环境数值模拟小组研发了 POM (Princeton Ocean Model) 海洋模式,该模式垂向采用 σ 坐标系,水平方向采用正交曲线坐标系,采用模态分裂法,将自由面的三维流动问题分裂为表面波的传播(外模态)和内波的传播(内模态)问题。之后水动力数值模拟出现了百家争鸣,ECOM^[10]、MOHID^[11]、GETM^[12]、ROMS^[13]、EFDC^[14]、COHERENS^[15]、HAMSOM^[16]、ELCIRC^[17, 18]、FVCOM^[19]、Delft3D^[20]等模式大量应用于海洋、海湾、河口海岸和大陆架这些实际水域的水动力模拟。

近年来国内学者也广泛开展了对河口、海岸三维水动力数学模型的研究,提出或改进了一些计算方法。易家豪和叶雪祥^[21]、赵士清^[22]通过在垂线方向上划分若干层水体,把三维问题简化为二维问题,建立的三维数学模型既节省了存储量又节省了工作量。韩国其^[23]引入无尺度垂向坐标,利用破开算子法求解微分方程,对长江口南港潮汐流场进行了数值模拟。窦振兴等^[24]基于Navier-Stokes方程,采用 σ 坐标变换,基于过程分裂法计算了渤海的三维潮流运动。卢启苗^[25]、李孟国^[26]将三维潮流数学模型应用到了实际工程当中去并取得了较好的结果。宋志尧等^[27]建立了三维潮流的计算模式,该模式基于模态分裂法和ADI格式,把这个计算模式用于海岸辐射沙洲的潮流场模拟取得不错的效果。刘子龙等^[28]采用平面正交曲线坐标变换,在垂向上采用无量纲化,这样整个计算域就被转变成了固定的规则计算域,再进行算子分裂,把其用于长江口的三维水流模拟,通过实测资料的计算验证说明了模型的可适用性。白玉川^[29]以N-S方程为基础,垂向采用 σ 坐标变换,利用有限元和有限差分结合的方法进行求解,建立了三维潮流数学模型可适应于具有复杂岸线的海域,对于重点关注的区域还可进行局部加密。Chao等^[4]采用三维潮流模型计算了海岸潮流运动。张存智^[30]建立了斜压条件下的三维浅海环流模式,该模型采用ADI方法进行差分计算,采用分步方法和总变差格式(TVD)来求解各个标量方程,提高了模拟精度。刘桦和何友声^[31]建立了垂直方向为 σ 坐标系,水平方向为直角笛卡尔坐标系,涉及河口密度分层效应的三维潮流、盐度数学模型,采用模态分裂技术同时外模态用改进的ADI法求解。闫菊等^[32]运用三维正压流封闭数值模式,模拟了胶州湾M₂分潮的潮汐、潮流及其潮致余流。杨陇慧等^[33]把长江口、杭州湾及邻近海区作为整体,采用三维高分辨率非正交曲线网格进行了数值模拟,模拟了4个主要分潮。Zhan和Li^[34]应用大涡模拟技术较好地模拟了台风过境时中国南海的风生流流场。张越美和孙英兰^[35]基于ECOM模型,同时引入干湿网格法以便更好地模拟潮滩的涨落,在此基础上建立了渤海湾三维变动边界潮流模型。目前,在河口、海洋、湖泊等流场的数值模拟中采用静水压强假定已经得到了广泛的应用,也取得了不错的效果。而在三维潮流数值模拟中考虑非静压假定作用的尚不多见,张景新^[36]通过尺度分析,在静压假定的基础上,引入了动压修正,同时考虑波浪及湍动作用,建立了垂向 σ 坐标和水平非正交曲线坐标的三维水流运动控制方程。

1.2.2 近海环流研究进展

中国近海海域从北到南依次是渤海、黄海、东海和南海,其中属于陆缘浅海的有渤海、黄海和东海。海洋环流是海洋中物质输送和能量传输的重要途径,是海洋物理过程的根源所在,近海环流对近海海域物质输运的影响更是不言而喻。中国近海的环流结构非常复杂,它受全球性的潮流(如黑潮)、海域上空的季风场、沿岸河流的入海径流量、潮流非线性效应以及海域轮廓和地形等多种因素的共同影响。从20世纪80年代至今,许多学者纷纷投入中国近海海域的数值模拟研究,其中在近海环流研究方面取得了较为丰硕的成果。

奚盘根等^[37]早在20世纪80年代初就提出了一个东中国海环流诊断模型。Choi^[38]以均匀风场为强迫力,深度浅于200 m的渤海、黄海、东海的风生环流的数值实验。窦振兴等^[39]建立了一个渤海风海流的二维模型。张存智等^[40]对渤海潮流分别与夏季和冬季季风海流的合成流动进行了数值模拟,探讨了潮流与季节性风海流相互作用下的渤海正压环流的性质。廖经榜和刘兴泉^[41]通过数值试验对冬季渤海和北黄海的环流特征进行了模拟分析。汤毓祥^[42]

采用 Tee 的三维非线性潮汐模式计算了东海和南黄海的 M_2 分潮, 并据此模拟了此海区的潮流余流。Chao^[43]用三维有限差分模式计算探讨了黑潮、季风及长江流量等对东中国海环流的影响。王东晓等^[44]应用一个热带海洋两层半模式模拟了南海上层海洋的季节性环流, 研究结果表明该模型能够较好地模拟南海海盆尺度的环流系统。乔方利等^[45]同时考虑黑潮和潮流的作用, 对黄海及东海的环流进行了数值模拟, 模拟出的黑潮路径与观测结果相吻合。随着 21 世纪的到来, 在中国近海海域的数值模拟研究工作吸引着越来越多的学者。周旭波和孙文心^[46]开创性地为整个东中国海设计了一种自适应网格, 该网格能够同时兼顾光滑性、正交性及疏密性, 并基于该网格成功地模拟了东中国海海域的潮汐变化。朱建荣等^[47]基于 ECOM-si 模型建立了高分辨率湍流闭合的黄海、东海海洋环流数值模式, 成功模拟出了夏季黄海和东海的主要环流。陈敏等^[48]采用高精度的 POM 模式, 考虑了海底地形、外来海流、长江径流、海面风应力、海面热通量等多方面因素, 对冬季东中国海环流结构进行了数值模拟研究。Lei 等^[49]基于拉格朗日环流理论对东海和黄海的拉格朗日环流进行了模拟研究, 模拟结果表明黄海冬季环流存在明显差异。在探索不同数值模式的同时, 数据观测技术也在不断进步, 有学者根据经度较高的卫星观测数据对近海环流进行了分析。温国义等^[50]通过对中国东部陆架海的 NOAA/AVHRR 数据进行 SST 换算得到了北部海域冬季的流场变化, 分析了黄海和渤海的环流路径。

1.2.3 河口盐水入侵研究进展

河口感潮段受海洋潮汐涨落的影响, 有海水侵入。由于河口段是河流与海洋衔接的部位, 河口的动力因素比河流复杂。多变的水动力因素, 复杂的地形, 以及它们本身的不稳定性造就了河口区的盐水入侵有着多种多样的形式和特性。根据河口盐淡水混合特征, 划分河口为盐水楔型、峡湾型、部分混合型和强混合型^[51]。

随着数值计算方法和计算机技术的发展, 数值模拟被引入到河口盐水入侵的研究中, 数值模型经历了从一维到三维, 从简单到复杂的发展过程。朱留正^[52]应用扩散、质量守恒方程对长江口盐度纵向分布和入侵范围进行了计算, 他指出长江口的盐淡水混合属于缓混合型, 其水流特征反映了盐水入侵对河口的影响, 并构成了复杂的环流形态。沈焕庭等^[53]对长江口盐度的分布特征进行了初探, 提出北支盐水倒灌的概念, 并分析了南水北调工程可能产生的影响, 为之后的研究奠定了基础。徐君亮^[54]对伶仃洋的盐水入侵和盐水楔的活动规律进行了探讨。韩乃斌^[55]根据多年的同步遥感盐度资料, 对长江口北支的盐水倒灌进行了分析。金元欢和孙志林^[56]在分析了中国众多河口实测盐度分布资料的基础上, 首次归纳了中国河口盐淡水混合的基本特征, 并根据不同类型河口对典型的河口盐淡水混合特征进行了阐述。赵士清^[57]和沈永明等^[58]分别用 ADI 法建立了矩形网格下的平面二维的盐度模型。胡振红等^[59]基于 N-S 方程和应力-通量代数湍流模型, 建立了温度和盐度分层流的应力-通量代数模型, 成功模拟了温度和盐度梯度同时存在的密度分层流。王义刚和朱留正^[60]通过垂向 σ 坐标变换, 将不规则计算区域化为矩形区域, 然后从三维非恒定流的雷诺方程出发, 并且沿着水体进行横向积分, 继而推导出沿水宽平均的垂面二维流体运动和盐度扩散方程。Guangdou^[61]建立一个二维水动力、盐度模型, 该模型考虑了径流、潮汐入流、海平面等因素对河口盐水体的影响, 然后把模型应用于 Loxahatchee 河流的水动力、含盐度模拟, 计算值与实测的潮汐和盐度数据

吻合较好。Nebiyu和Louis^[62]采用三维SEAWAT模型模拟了在气候变化和抽水影响下的盐水入侵情况。Meselhe和Noshi^[63]采用H3D模型,在对流域内各站点一年内的完整实测数据进行较好率定的基础上,模拟了路易斯安纳州南部Calcasieu-Sabine水域的水动力和盐度分布,最后精确模拟分析了Calcasieu-Sabine的水动力和盐度。朱建荣^[64]采用三维ECOM模式模拟了长江口的盐度分布。匡翠萍^[65]通过采用简单的坐标变换,将整个计算域转换成单位方体,对变换后的控制方程进行差分离散,最后用追赶法求解方程。该模型已经成功应用于长江口的盐水入侵模拟。河海大学海岸及海洋工程研究所^[66-68]通过 σ 坐标变化,使整个计算区域采用相同的垂向分层,将三维水流运动分裂为表面重力波(外模式)和内重力波(内模式),在此基础上建立了河口三维非线性斜压水流、盐度数学模型。龚政^[69]基于POM模型(Princeton Ocean Model)建立了三维非线性斜压水流盐度数学模型。Zhu等^[70]也建立了三维斜压预报模式,对长江河口盐水入侵进行了模拟分析。马刚峰等^[71]改进了ECOM模式中水平扩散项的计算方法,并对该方法进行了验证,发现其可以大大提高水平扩散项的数值计算精度。利用改进后的ECOM模式建立了长江口三维盐度数值模型,模型可以较好地反映出垂向表底层的盐度差异。潘军宁和辛文杰^[72]建立了一种稳定性好、计算效率高的三维潮流及盐水入侵数学模型。该模型采用剖开算子法求解,用交替方向隐式格式求解三维盐度对流扩散方程中的扩散项,用特征线嵌入网格法计算对流项。最后模拟分析了长江口深水航道开挖对盐水入侵的影响。项印玉等^[73]应用改进的ECOM模式,分不考虑台湾暖流、不考虑苏北沿岸流以及暖流和沿岸流都不考虑这三种情况对长江口在冬季陆架环流影响下的盐水入侵进行了数值模拟。卢薇等^[74]基于有限元原理的FEFLOW得出了研究区在不同开采条件下海水的入侵面积不同的结论。

1.2.4 波浪数学模型研究进展

波浪是一种表面波,是海岸河口地区经常出现的一类重要的物理现象。由于受到复杂地形、障碍物和水流等因素的影响,波浪在由外海向岸边的传播过程中,可能发生浅化、绕射、反射、折射、底摩擦能量耗散及破碎等一系列复杂的现象。对于海岸工程和一些实际问题来说,波浪场(波高、周期、波浪传播方向等波浪要素以及波浪破碎产生的辐射应力)的确定是十分必要的。数学模型是研究波浪传播运动规律的一种既简单又有效的手段。波浪场的数值模拟经历了由规则波到不规则波,由线性波到非线性波的发展过程,迄今为止,已有大量关于波浪模型的研究及其应用的成果问世,这其中最主要的波浪模型有缓坡方程、Boussinesq方程和能量平衡方程模型。

缓坡方程是用线性波浪理论研究近岸波浪传播变形的基础方程。原始的缓坡方程由Berkhoff^[75]提出,基于小振幅波和缓坡假定,推导出二维线性的椭圆形缓坡方程,该方程只是适用于较小的计算域,方程中考虑了波浪的浅化、折射、绕射、反射和破碎等效应。对近岸缓坡区域波浪传播变形的模拟比较有效。由于缓坡方程可考虑波浪在由外海向近岸传播过程中的波浪浅化、折射、绕射、反射及破碎等效应,自从这个椭圆形缓坡方程被提出来以后,国内外的众多学者围绕它做了大量研究^[76-93],在椭圆形缓坡方程的基础上忽略波浪在主流传播方向上的反射、绕射等作用,得到了抛物线形缓坡方程,方程的形式相对比较简单,这个方程的提出使得波浪的计算范围逐渐扩大,计算效率大大提高。

1872年, Boussinesq假定水质点水平速度上下均匀, 垂向速度从水底层向表层逐渐增大, 在这基础上推导出了B方程, 1967年, Peregrin^[94]推导出变水深条件下的二维B方程。随后, 国内外学者大力发展了B方程的理论和应用, 目前B方程可以应用于较大水深的波浪模拟, 可以考虑规则波和不规则波在复杂地形上发生的浅化、折射、绕射、反射效应以及波浪破碎等^[95-99]。B方程存在一个较大的缺点, 对一个波长内的网格密度要求较高, 这样就造成了计算量的增大, 因此B方程不太适合较大区域和较长时间尺度的波浪计算, 因此多用于港口航道波浪模拟, 非线性波与流相互作用理论以及非线性波与波相互作用^[100]。

能量平衡模型是一种基于能量守恒原理的波浪谱模型, 模型中不仅能够考虑水深变化、流和障碍物等对波浪的影响, 而且同时可以考虑风能输入、白浪耗散、波浪破碎、底摩擦耗散和波一波非线性相互作用等物理过程, 并且上面的这几种物理过程都可以用不同的源函数进行表达。正是由于能量平衡模型没有特别苛刻的时间和空间步长要求, 它可适用于较大尺度的区域计算。随着人类的不断钻研和对波浪各种物理过程的探求及其深入认识, 波浪能量平衡模型的发展经历了第一代、第二代, 发展到现在出现了第三代波浪理论, 第三代波浪理论可以考虑波浪浅水变形以及其他非线性作用的影响。WAM模型是在事先不对谱型加以任何假定的基础上直接进行参数化, 从而对能量平衡方程中的各物理过程项做更全面的考虑。袁业立等^[101]基于波数谱空间下的能量平衡方程建立的LAGFD-NWM海浪数值模式能够较好地模拟各波浪特征要素和波浪的方向谱。1990年以后, 在WAM的基础上又相继发展了WAM cycle 4和WAVEWATCH-III等海浪模式。对于大尺度空间波浪的传播过程可以由WAVEWATCH-III模式进行模拟, 在波浪的传播过程中模式综合考虑了流的空间变化和地形变化所引起的波浪折射作用、浅水变形作用和线性的波浪传播运动过程等。该模式改进了模型的控制方程、程序结构等, 不仅利于模式的并行计算提高模式的计算效率, 最为关键的是合理考虑了波流相互作用和风浪物理机制^[102]。荷兰Delft技术大学(Delft University of Technology)的Ris等^[103]和Booij等^[104]对历年来波能输入、白浪耗散、底摩擦耗散以及各波能能量之间的相互转换进行了总结, 综合考虑了风能量输入、白浪耗散、底摩擦、水深诱导波破碎和非线性波一波相互作用之后, 提出并且发展了适用于海岸湖泊及河口地区的浅水波浪数值预报模式。Booij把SWAN模式的计算结果与线性理论以及现场实测资料进行对比验证, 结果表明: 第三代浅水谱波浪模型可以用于模拟潮流、地形、风场联合作用下的波浪场, 并且取得了不错的结果。最新版本的SWAN41.10已经包含了波浪的绕射, 使模型更加完善。SWAN模型的求解采用有限差分法。基于动谱平衡方程的第三代波浪数值模型可以较为合理地模拟受近岸水动力变化影响的各种风浪演化过程, 可以应用于基于过程描述的泥沙运动模型, 因此本文将采用SWAN 模型计算波浪场。

1.2.5 波浪潮流泥沙耦合数学模型研究进展

Unna^[105]最早开始关注和研究潮流影响下的波浪场, 分析了均匀流与重力波两者同向及反向时波流的相互作用情况。Longuet-Higgins和Stewart^[106-108]引入辐射应力的概念, 将波流相互作用的机理进行了阐明, 为波流相互作用提供理论基础。Longuet-Higgins和Stewart^[109]认为, 由于波浪传播和破碎而引起的波浪剩余动量流就是波浪辐射应力, 正是由于动量的存在才导致流体受力的变化, 进而引起了波浪的增减水以及波生流。辐射应力的概念可以解释破波带

以外波浪的“setdown”和以内的“setup”，有角度的入射波产生的沿岸流（Bowen^[110]，Longuet-Higgins^[111, 112]）等现象，以及用来研究自由传播的重力长波和短波之间的相互作用（Longuet-Higgins^[113]，Hasselmann等^[114]，Garrett和Smith^[115]）。Whitham^[116]、Bretherton和Garrett^[117]引入了谱作用量守恒的概念。Hasselmann^[118]忽略了波生动量通量的辐聚产生的虚质量元引起的势能交换和波浪动量的变化会吸收一部分辐射应力梯度这样两种效应。随后Garrett和Smith^[115]同时考虑了辐射应力和质量守恒，这就解决了上面两种效应被忽略的问题。郑永红等^[119, 120]提出一种计算辐射应力的新方法，可以将波浪辐射应力与抛物线形缓坡方程中的待求变量联系起来。Feddersen^[121]利用PM谱计算波浪辐射应力，并且考虑了波浪的方向谱分布对辐射应力的影响，把观测值与经典理论计算值进行了比较。丁平兴等^[122]阐述了不同的波动理论条件下辐射应力的计算方法和计算结果。为了将辐射应力加入到三维原始方程的POM、ROMS等海洋模式中，Mellor^[123-125]导出了三维波流方程，并把该波流方程在POM模式中作了应用。Xia等^[126]也对辐射应力的三维结构进行了研究。涡旋力方法是与通过辐射应力对动量方程进行研究相对的方法，此方法通过多尺度分析的手段将波浪的平均效果表现为伯努利头、涡旋力、虚假三维斯托克斯对流项和参数化波生加速度，从而展开波流相互作用的研究^[127, 128]。上面的研究都是从动量和质量的交换与守恒性进行的波流相互作用的研究，当风吹过海洋表面时，会产生频率比较低的海流，同时海浪也会产生，海面的波浪会通过海面粗糙度的变化对海面风应力有显著影响^[129, 130]，从而改变海洋模式的上表面边界条件。Jansen^[131, 132]指出在初期风浪情况下波浪引起的应力占总应力的大部分，这时候风的拖曳系数就会受到影响。波浪破碎会使水体的湍动能得到加强，进而影响动量的垂向混合^[133]。乔方利等^[134]将流速的脉动部分再次分为环流生和波浪生两部分，从而推导出三维的波浪运动产生的应力。波浪底部轨道速度在近岸浅水的地方，其量级的大小已经达到和近岸流相当的地步，在有波浪作用下产生的底部切应力会比没有波浪作用时产生的底部切应力的大小大一个量级^[135]。Grant和Madsen^[136]发展了浪流相互作用的底边界层模型。Styles和Glenn^[137, 138]在浪流边界层里考虑了层结的影响。波浪对流会产生影响，反过来流也会对波浪产生影响。在流对波浪的影响方面，Tolman^[139]分析了不定常的潮汐水位流速的变化如何影响陆架区的波浪。由于水深和流速随时间的变化引起的波浪绝对频率的变化与多普勒频移具有相同的量级，因此潮汐在风浪模拟中有着不可忽视的作用。Holthuijsen和Tolman^[140]指出各种大洋环流会对波浪场产生影响。Lewis^[141]基于SWAN波浪模型与ECOM海流模型将海浪对潮流的影响进行了研究。Wolf和Prandle^[142]通过对实测数据的分析，研究了波流之间的不同影响。

目前大多数波流相互作用的模型都是采用现有的结构网格的海洋模型（ROMS、POM、HYCOM等）和现成的海浪模型（WAM、WAVEWATCH、SWAN）进行耦合。耦合的技术手段主要分为直接的模式耦合和通过耦合器（MCT，ESMF）进行耦合。直接耦合是海洋模式和波浪模式在同一个CPU上交替运行，而通过耦合器则是将两个模式分开计算，间隔一定时间进行一次数据交换。而耦合器就相当于一个暗箱操作，无须对两个模式内部架构非常熟悉，只要独立运行各个模式得出需要的结果，然后通过耦合器进行数据的交换。Xie等^[143, 144]通过海表应力、辐射应力和底部应力将POM模式和SWAN模式耦合起来，模拟了波浪对风暴潮影响。辛文杰^[145]利用Soulsby边界层模式，不考虑波浪运动的瞬时变化，只研究波浪场所产生的“波浪辐射应力”“波浪摩阻应力”以及“波浪挟沙力”等动力要素，建立了潮

流和波浪综合作用的数学模型,模拟计算了河口地区的泥沙运动情况。金正华等^[146]运用建立的二维非线性波浪、潮和风暴耦合模式对波流相互作用下的底应力及其对耦合波浪场和流场的影响进行了分析,分析表明,波流相互作用时,底应力明显增大,增大的底应力对水位及其流速的大小有较大的影响,但是对波浪场的影响却比较小,这种影响在近岸浅水区更加显著。尹宝树等^[147]研究了渤海波浪和潮汐风暴潮的相互作用对波浪模拟的影响。Byung 等^[148]建立了一个波浪、潮流、风暴潮共同作用下的基于第三代风浪理论和二维潮汐—风暴潮的数学模型,并用该模型研究了在 1983 年黄海冬季季风时,风浪、潮流、风暴潮的相互作用。从模拟结果可知,在黄海地区,由于波流共同作用,底部切应力明显增加,但是当水深达 50m 时,底部切应力的这种增加就不明显了。Moon 等^[149,150]基于海表面应力和波浪破碎的影响以及涡旋力的方法,从动力学上将 WAVEWATCH-II 波浪模式与 POM 海洋模式耦合起来,这就建立了一个浪—潮—流耦合模型,用这个耦合模型研究了潮汐对浪流的影响以及波浪对 SST 分布的作用。陆永军等^[151]将波浪的传播过程作了周期平均,将平均的波浪要素叠加到潮流运动方程中,建立了波流联合作用下二维泥沙数学模型。Warner 等^[152]基于 ROMS 和 SWAN 模式,通过 MCT 将三维辐射应力和底边界模型进行耦合建立了无黏泥沙输运模型。Warner 等^[153]在考虑波浪 (SWAN 或者 REF/DIF) 的情况下将 ROMS 与准三维模型 SHORECIRC 进行了对比,得出了比较类似的结果。从目前的研究来看,浪潮流及泥沙耦合的数值模拟还远没有达到完善的地步,仍需科研工作者们继续努力。

1.3 本书的主要工作

本书采用基于 Lagrangian 粒子追踪的数值模拟方法对渤海环流结构及其影响因素进行了研究。以往对太湖水动力的研究都比较单一,有的考虑风对湖泊流场的影响,有的考虑吞吐流对湖泊流场的研究,有的考虑地形对湖泊的影响。但是综合考虑风场、地形以及吞吐流对太湖流场影响的文章基本没有。另外对于 EFDC 模型本身所带的波浪模块不能很好地反映波浪潮流之间的相互作用,在此基础上结合 SWAN 波浪模型与 EFDC 模型进行耦合,取得了一定的成果。本书的主要工作如下:

(1) 基于 EFDC 开放代码建立了渤海三维斜压模型,并通过实测的潮汐和潮流资料以及温度和盐度的平面资料及测站月平均资料,对模型进行了较为全面的验证。在此基础上采用 Lagrangian 粒子追踪法,对渤海冬季和夏季环流进行了数值模拟研究,并进行了 6 组数值试验,对风、海表热通量、径流及潮等环流的影响因素进行了进一步的研究。

(2) 采用三维潮流盐度数学模型对瓯江口海区进行了数值模拟。通过大量实测资料对模型作进一步的验证,对比实测资料校核了模型参数,把模拟结果和实测潮位、流速和盐度进行了比较,吻合较好,并对瓯江口海区的潮流场以及盐度场进行了详细分析,发现近岸和河口及乐清湾大部分区域往复流明显,离岸越远旋转流越明显,河口处盐度在垂线分布上呈强混合型。

(3) 对实测风场和吞吐流作用下的太湖流场进行了数值模拟,水位模拟结果与实测值符合较好,结果表明该模型可以适用于太湖流场的数值模拟。在此基础上详细分析了不同风场、地形及吞吐流条件对太湖水动力特性的影响。比较各种方案的流场可知,风对太湖流场

结构起主导作用,风场是影响潮流的最敏感的因素;湖底地形的变化对各层风生流场有一定的影响;吞吐流对整个湖泊水流结构影响微弱,对湖泊出入口局部水域水流流态有一定影响;在静风条件下,湖泊水流主要由吞吐流驱动,吞吐流对出入口局部水域水流流态有较大影响。

(4) 根据河口动力特征,采用 σ 坐标下的三维斜压流场数学模型和盐度扩散模型对瓯江口的盐水入侵进行了数值模拟,并对模型中涉及的基本方程、参数、边界条件、计算方法、离散格式、时间步长限制条件等作了介绍。利用实测资料讨论分析了瓯江河口在不同径流、风向和潮流作用下的盐水入侵及其盐度的分层情况。模拟发现在径流量较小和吹向河口的风作用下瓯江河口盐水入侵更加严重,在大径流作用下河口的盐度会出现分层,而且模型结果也表明在瓯江河口风因素不是导致盐水入侵和盐度分层最主要的因素。

(5) 基于第三代海浪模型 SWAN, 本文利用 QuikSCAT/NCEP 混合风场作为模型的输入风场, 并对渤海的一个观测点进行模拟, 将模型输出结果与海上观测进行比较。同时对太湖的风生波浪进行了数值模拟。最后模拟了实测风场作用下的瓯江口海区的波浪场, 为下一步模拟波流耦合作用下的泥沙运动提供波浪数据。

(6) 实现了 EFDC 水动力模型和 SWAN 波浪模型的双向耦合, 水动力模块计算的流场和水面高度提供给波浪模块, 波浪模块计算出潮流影响下波浪运动短时间内发生的变化, 并以波要素的形式提供给水动力模块, 重新计算出波浪影响下的潮流场, 利用 Styles 和 Glenn^[137, 138]的波流模型 WCM 计算波流共同作用下的底部切应力。在此基础上建立了波流作用下的瓯江口 D 海区三维泥沙数学模型, 模拟了瓯江口 D 海区的泥沙输移扩散。

第2章 三维水动力、波浪及泥沙数学模型

近年来,随着计算机性能的高速发展和人们对河口海岸流场垂向分布等实际问题研究的需要,三维水动力数值模型已经被应用于区域较大的实际流场计算。在海岸、河口等水深相对较浅水域,由于波浪会发生绕射、反射、破碎等一系列的波浪变形,波浪和潮流共同作用于海床表面可能产生较强烈的海岸泥沙输运。在岸滩平缓的区域,潮流往往很难造成大量的泥沙悬扬,造成大量泥沙悬扬的主要动力是波浪,尤其当水深浅、风浪强时,波浪掀沙、潮流输沙的作用更为显著。因此比较准确地模拟风浪过程,是合理描述近岸泥沙运动的基础。由此可知海岸地区的泥沙运动往往是在复杂风、浪、流共同作用下形成的。而潮汐、波浪、泥沙构成了一个极其复杂的耦合系统,三者之间通过不同的机制相互作用、相互影响和相互制约。唯有全面考虑它们之间的关系才可以比较准确地模拟出真实的水动力环境,从而找出泥沙输移转化的规律。

2.1 三维水动力数学模型

美国 Virginia 海洋研究所的 Hamrick 等根据多个数学模型集成开发研制的环境流体动力学模型,简称 EFDC 模型 (Environmental Fluid Dynamics Computer Code)^[14],该模型集水动力模块、泥沙输运模块、污染物运移模块和水质预测模块一体,可以用于模拟水系统一维、二维和三维流场、物质输运 (包括温度、盐度、非黏性和黏性泥沙的输运)、生态过程及淡水入流。其模拟范围包括河口、河流、湖泊、水库、湿地系统以及自近岸到陆架的海域。模型可以同时考虑风、浪、潮、径流的影响,并可以设置水工建筑物。该模型在国外已经得到广泛应用^[154-161],成为美国环保署首推的近海水环境数值模拟工具。国内也逐渐开展了对该模型的应用^[162-170]。

2.1.1 σ 坐标变换

浅水流动和物质输运三维数学模型垂向空间的离散通常在笛卡尔坐标系或 σ 坐标系下进行,对于不规则的海底床面地形,在笛卡尔坐标系下需要对床面做阶梯化近似处理,这种做法在一定程度上使床面的计算精度降低。另外,笛卡尔坐标下常采取垂向固定分层的做法,即任意水平位置的分层数与水深成正比,显然,这种网格系统对高剪切应力的浅水区的分辨率不高,且在给定底边界和水面边界条件时会遇到很大困难。为克服笛卡尔坐标的不足 (见图 2.1),把 σ 坐标变换引入到浅水流动和物质输运的三维数学模型中 (见图 2.2),经过坐标变换可以使整个计算水域具有相同的垂向分层数,这样就提高了浅水区的垂向分辨率,并且各垂向层的侧向岸边界条件都是一致的,这给数值计算带来很大方便。