

风暴潮、浪数值预报

沙文钰 杨支中 冯 芒 李 岩 著



海洋出版社

凡夫俗子，非我即你

◎ 香港作家 梁文道 著



风暴潮、浪数值预报

沙文钰 杨支中 冯 芒 李 岩 著

海洋出版社

2004 年 · 北京

图书在版编目 (CIP) 数据

风暴潮、浪数值预报/沙文钰等著. —北京: 海洋出版社, 2004.11

ISBN 7-5027-6240-X

I. 风… II. 沙… III. 风暴潮—数值天气预报 IV. P731.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 116724 号

内 容 简 介

中国是世界上海洋灾害最严重的国家之一, 其中风暴潮、浪灾害是最主要、最严重的。本书是海洋、大气科学理论和海洋灾害预报内容之一, 主要介绍风暴潮、浪的基本概念, 论述风暴潮、浪数值预报基础理论和各类海洋模型 (式) 的特点、功能, 以及具体应用的技术方法和详尽的海洋水文要素数值预报实践等内容。本书是一本创新性、实用性较强的风暴潮、浪数值预报专著。

本书可供从事海洋、气象、海洋工程、航海科技人员和高等院校 (所) 有关专业研究生及教学人员阅读或作为教材, 也可供军事部门管理人员参考。

策划编辑: 申果元

责任编辑: 屠 强

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)

天津市蓟县宏图印务有限公司 新华书店发行所经销

2004 年 11 月第 1 版 2004 年 11 月第 1 次印刷

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 14.5

字数: 350 千字 印数: 1~1500 册

定价: 48.00 元

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

风暴潮、浪灾害是世界海洋灾害中最严重的灾害。中国拥有漫长的海岸线和辽阔的海域，为经济发展提供了良好的客观有利条件。但是，每年夏、秋两季遭热带气旋（台风）袭击，而冬、春两季又常受到气旋后部强冷空气和寒潮大风的影响，致使中国沿海成为海洋灾害的频发区。风暴潮、浪招致的包括中国在内的世界海洋灾害的事例，在本书中已有局部的统计，即便如此，用触目惊心来形容也不为过。无疑，如能及时准确地预报，将会把伤亡和损失减少到最低程度。因此，风暴潮、浪的发生、发展和衰亡等物理机制的研究，特别是风暴潮、浪预报方法的探求和实际应用，确实具有迫切的现实意义。

本书命名为《风暴潮、浪数值预报》，我们丝毫不想夸张，也无煽情之意，只想把真实做的工作展现在读者的面前。近年来，我们在平静的心态下从事这方面研究，在实践中积累了宝贵的经验，现把它整理成本书。文陋心诚，借以献给社会，尤其是献给和我们如切如磋，如琢如磨，真诚坦率的同仁朋友。如能给读者有帮益，也是一种执著的付出后的获得和拥有，从中体会到了清凉和静默中的一种表达，以襄盛举。

风暴潮、浪数值预报是在海洋动力学模型发展的基础上开展的。诚然，海洋动力学模型，像大气动力学模型一样，还处在不断研究的过程中，它有赖于数值方法的发展，新的量测技术所提供的新的认识和计算机容量的进步。一种模式，一个模型，除了在建立时所具有的特性外，它们真正的可靠性完全取决于不同时刻及特定环境下的验证，更主要的是要在努力并真诚地学习前人宝贵科学技术知识的同时，稍安勿躁，不断发展。理念上对历史技术仅仅应用是不够的，还要在实践的前提下科学地进行规划、创新和再开发，因而需要以厚实的理论、技术底蕴作基础，否则，那是绝对无益于数值预报发展的。

本书由沙文钰全面组织和编排，并撰写了第一、二章。其他各章的作者

如下：第三章，杨支中；第四章，沙文钰、杨支中；第五章，沙文钰、冯芒；第六章，冯芒；第七章和第八章，杨支中、李岩、沙文钰；第九章，李岩、沙文钰；第十章，杨支中、沙文钰。本书在完成过程中，朱首贤博士提供了大量的文献资料和具体的支持；海军南海舰队海洋水文气象中心任崇高级工程师等提供了珍贵的现场观测和试验资料；得到了丁平兴、冯卫兵、孙照渤、杨修群、李训强、钟中、蒋国荣等教授的帮助；许崇金、宋学家研究员提供了宝贵的观测资料并予以支持；文圣常院士、伍荣生院士给予了热情支持和鼓励。在此一并表示诚挚的谢意。

我们深知对风暴潮、浪数值预报领域的研究，难度极大，也很复杂，加之我们水平所限，书中难免有错、漏之处，敬请读者提出宝贵意见。

沙文钰
2004 年 10 月于南京

目 次

第 1 章 风暴潮、浪基础	(1)
1.1 概况	(1)
1.1.1 风暴潮灾害	(1)
1.1.2 巨浪灾害	(3)
1.1.3 风暴潮、浪对海上军事活动的影响	(4)
1.2 风暴潮和海浪的研究与预报状况	(4)
1.2.1 风暴潮灾害的研究现状	(4)
1.2.2 海浪研究与预报	(6)
1.3 风暴潮概念	(8)
1.3.1 风暴潮定义	(8)
1.3.2 风暴潮分类	(9)
1.3.3 中国风暴潮的特点和预报	(10)
1.4 风暴潮最新观测事实和理论定性分析	(11)
1.4.1 风暴潮观测事实	(11)
1.4.2 风暴潮理论定性分析	(12)
1.5 海洋和大气交界面的空气动力学粗糙度	(13)
1.5.1 引言	(13)
1.5.2 COARE 算法	(14)
1.5.3 海面空气动力学粗糙度参数化方案	(16)
1.5.4 参数化方案的相互比较	(17)
1.6 中国海潮波的研究	(22)
1.6.1 研究背景	(22)
1.6.2 东中国海潮波的研究状况	(23)
1.6.3 南海潮波的研究状况	(25)
1.6.4 台湾海峡潮波的研究状况	(26)

1.7 风暴潮监测与预报系统.....	(27)
1.7.1 风暴潮监测系统.....	(27)
1.7.2 风暴潮预报系统.....	(28)
1.7.3 风暴潮预报的准确度.....	(30)
参考文献	(32)
第2章 风暴潮陆架动力学基础	(37)
2.1 近海潮汐和非潮汐的水位变化.....	(37)
2.1.1 近海潮汐.....	(37)
2.1.2 非潮汐的水位变化.....	(39)
2.2 潮汐和风暴潮的控制方程.....	(40)
2.2.1 沿水深积分的运动方程.....	(40)
2.2.2 定常环流.....	(45)
2.2.3 潮汐和风暴潮的控制方程.....	(46)
2.2.4 边界条件.....	(46)
2.3 潮势和常规潮汐预报原理.....	(48)
2.3.1 潮势.....	(48)
2.3.2 常规潮汐预报原理.....	(50)
2.4 陆架海流的垂向结构.....	(52)
2.4.1 谱模型.....	(53)
2.4.2 均质流体.....	(55)
2.4.3 成层流体.....	(56)
2.5 陆架风暴潮的深转模型.....	(58)
2.5.1 深转风暴潮模型的近似方程组.....	(58)
2.5.2 深转风暴潮模型的讨论.....	(62)
参考文献	(65)
第3章 热带气旋(台风)海面气压场和风场模型	(66)
3.1 对称型热带气旋(台风)模型气压场和风场计算方法.....	(67)
3.2 非对称型的热带气旋模型气压场和风场计算方法.....	(68)
3.2.1 非对称台风海面气压场模型和风场模型的推导.....	(68)
3.2.2 台风海面气压场特征等压线生成技术.....	(71)
3.3 热带气旋(台风)资料处理和计算流程.....	(72)
3.3.1 热带气旋(台风)要素插值方法.....	(72)

3.3.2	热带气旋(台风)外围背景风场和模型风场的合成·····	(73)
3.3.3	热带气旋(台风)风场的同化·····	(74)
3.3.4	热带气旋(台风)风场计算流程·····	(74)
3.4	台风个例海面气压场和风场模拟·····	(76)
	参考文献·····	(78)
第4章	风暴潮模式 ·····	(79)
4.1	引言·····	(79)
4.2	风暴潮流运动的控制方程·····	(80)
4.2.1	广义曲线坐标下的浅海动力学方程·····	(80)
4.2.2	流速逆变张量方程·····	(82)
4.3	模式方程的补充完善·····	(84)
4.3.1	完善的风暴潮模式·····	(84)
4.3.2	运动学边界条件·····	(87)
4.4	数值离散方案·····	(88)
4.5	漫滩计算和曲线网格的生成方法·····	(92)
4.5.1	漫滩计算的干湿点判断方法·····	(92)
4.5.2	曲线网格的生成方法·····	(93)
	参考文献·····	(94)
第5章	近岸海浪模式 ·····	(95)
5.1	波浪数值模型简况·····	(95)
5.2	SWAN 海浪模式基本原理·····	(97)
5.2.1	基本控制方程·····	(97)
5.2.2	物理过程处理·····	(97)
5.3	SWAN 海浪模式的差分格式·····	(101)
	参考文献·····	(103)
第6章	广义曲线坐标系下的缓坡方程海浪模型 ·····	(104)
6.1	缓坡方程的动力框架·····	(104)
6.1.1	笛卡尔坐标系下波浪折射-绕射控制方程的数学提法·····	(104)
6.1.2	理论模式的推导·····	(110)
6.2	缓坡方程海浪模式中引入自适应曲线网格的可行性研究·····	(112)
6.2.1	数值模型·····	(112)
6.2.2	网格分辨率对波浪计算影响的数值试验·····	(113)

6.2.3	缓坡方程计算分辨率选取的初步理论分析	(115)
6.3	广义曲线坐标缓坡方程的建立	(118)
6.3.1	笛卡尔坐标系下的波浪折-绕射数值模型	(118)
6.3.2	广义坐标系下的波浪折-绕射数值模型	(119)
6.4	自适应曲线网格下的差分方程及其求解	(123)
6.4.1	差分格式	(123)
6.4.2	边界条件	(126)
6.4.3	计算流程	(127)
6.5	自适应曲线网格缓坡方程海浪模式的应用检验	(127)
6.6	缓坡非均匀水流中的波浪方向谱折绕射联合模型	(129)
6.6.1	随机波面的描述	(129)
6.6.2	方向谱形式	(130)
6.6.3	方向谱折绕射联合模型	(132)
6.7	广义坐标系下的波浪谱折绕射数值模型	(133)
6.7.1	真实地形中的海浪谱折绕射联合模型	(133)
6.7.2	差分格式与差分方程	(136)
6.7.3	海浪方向谱的离散	(143)
6.7.4	数值计算步骤	(143)
	参考文献	(144)
第7章	风暴潮和海浪耦合嵌套模式 (一)	(146)
7.1	引言	(146)
7.2	湛江港计算区域选取及网格生成	(147)
7.2.1	计算区域及网格生成	(147)
7.2.2	边界条件和初始条件	(150)
7.3	湛江港风暴潮和海浪耦合模式	(150)
7.3.1	南海风暴潮和海浪模式嵌套	(150)
7.3.2	湛江港风暴潮模式和南海风暴潮模式的嵌套	(150)
7.4	湛江港风暴潮和海浪耦合嵌套模式的组成和数据流程	(154)
7.4.1	模式组成	(154)
7.4.2	模式的数据流程	(154)
7.5	基于遥感资料的滩地高程推算和漫滩模拟	(156)
7.6	9615 号台风个例的计算检验	(160)

参考文献	(163)
第 8 章 风暴潮和海浪耦合嵌套模式 (二)	(164)
8.1 南、东海风暴潮和海浪模式	(164)
8.2 汕头港风暴潮和海浪耦合模式	(165)
8.3 汕头港风暴潮和海浪耦合模式的框架及计算检验	(168)
8.3.1 模式组成和数据流程	(168)
8.3.2 7114 号台风个例的计算检验	(169)
第 9 章 预报实例	(171)
9.1 0214 号热带气旋风暴潮、流、浪预报	(171)
9.1.1 18 日 20 时风暴潮、流、浪实时预报	(172)
9.1.2 19 日 08 时风暴潮、流、浪实时预报	(175)
9.1.3 19 日 17 时风暴潮、流、浪实时预报	(177)
9.2 热带气旋风暴潮、流、浪预报对比试验	(182)
9.2.1 扣除气象预报误差的预报对比试验	(182)
9.2.2 采用数值天气预报产品的预报对比试验	(185)
9.2.3 同时考虑两者的预报对比试验	(190)
9.3 补充预报试验	(194)
9.3.1 0218 号热带气旋风暴潮、流、浪补充预报	(194)
9.3.2 0220 号热带气旋风暴潮、流、浪补充预报	(198)
第 10 章 风暴过程预报检验方法和模拟 (后报) 试验	(203)
10.1 模拟 (后报) 试验检验方法和结果	(203)
10.1.1 风暴潮误差分析	(203)
10.1.2 海浪误差分析	(204)
10.2 历史个例数值模拟 (后报) 及检验	(204)
10.2.1 影响湛江港的典型热带气旋个例选取	(205)
10.2.2 风暴增水模拟 (后报) 及检验	(208)
10.2.3 海浪模拟 (后报) 结果检验	(213)
10.3 汕头港增水模拟 (后报) 检验	(214)
参考文献	(221)

第 1 章 风暴潮、浪基础

1.1 概况

风暴潮、浪是来自海上的一种巨大的自然界的灾害现象，系指由于强烈的大气扰动——如热带气旋、温带气旋、暴发性气旋等天气系统所伴随的强风和气压骤变所致使的海面异常升降及狂浪的现象。它若和通常的天文潮，特别是天文大潮、高潮阶段叠加，往往会使其影响所及的海域水位暴涨、浪毁坡堤，乃至海水浸溢内陆，酿成巨灾。

1.1.1 风暴潮灾害

风暴潮 (storm surge) 灾害是所有海洋灾害中最严重的灾害。中外历史上的严重风暴潮灾害事例不胜枚举。1934 年 9 月 21 日，日本大阪湾所遭受的一次台风潮（由台风引起的风暴潮，日本称之为气象潮），毁坏房屋达 16 793 间，1 888 人死亡（冯士筌 1982）。1959 年 9 月 26 日，日本伊势湾名古屋一带的沿海地区发生台风风暴潮，潮高 3.45 m，4 700 人死亡，38 900 多人受伤，直接经济损失计有 5 000—6 000 亿日元。1970 年 11 月 13 日，在孟加拉湾沿岸发生的一次风暴潮，潮高 7.2 m，潮水淹没了大片土地和村庄，夺走了近 30 万人的生命。1990 年 9 月 8 日，美国墨西哥沿岸遭受强风暴潮袭击，有 6 000 多人被淹死。1991 年 4 月 29 日夜間，孟加拉湾出现风暴潮，6 m 多高的巨浪使整个吉大港淹水深 2 m，受灾人口达 1 000 万人，14 万人丧生，经济损失至少有 30 亿美元（陆渝蓉 1999，苏纪兰 1998）。

中国拥有漫长的海岸线和辽阔的海域，这一方面为经济发展提供了良好的客观有利条件，另一方面也使中国沿海成为海洋灾害的频发区。海洋灾害指风暴潮、巨浪、赤潮、严重海冰、地震海啸和溢油等。根据最新统计，

2002 年中国海洋灾害属常年偏轻年份，全年因海洋灾害造成的直接经济损失约 66 亿元，死亡、失踪人数共计 124 人，受灾人口约 1 000 万。其中风暴潮灾害造成直接经济损失 63.1 亿元，死亡、失踪 30 人，是 2002 年的主要海洋灾害（见表 1.1）。2003 年中国海洋灾害属正常年份，全年因海洋灾害造成的直接经济损失约 80.5 亿元，较 2002 年严重，死亡、失踪 128 人，受灾人口 2 000 多万。风暴潮灾害造成直接经济损失 78.77 亿元，死亡、失踪 25 人，是 2003 年的主要海洋灾害（见表 1.2）。

表 1.1 2002 年主要海洋灾害损失统计（取自国家海洋局 2002 年中国海洋灾害公报）

灾种	发生次数	灾害次数	死亡、失踪（人）	经济损失（亿元）
风暴潮	8	2	30	63.1
巨浪	33	6	94	2.5
赤潮	79	8	无	0.2
溢油	6	2	无	0.05
合计	126	18	124	65.9

表 1.2 2003 年主要海洋灾害损失统计（取自国家海洋局 2003 年中国海洋灾害公报）

灾种	发生次数	灾害次数	死亡、失踪（人）	经济损失（亿元）
风暴潮	14	5	25	78.77
巨浪	34	10	103	1.15
赤潮	119	14	无	0.43
溢油	5	2	无	0.17
合计	172	31	128	80.52

每年夏、秋两季，中国沿海都会遭台风袭击，而冬、春两季又常受到气旋后部强冷空气造成的大风袭击，因而是多风暴潮的区域。严重的潮灾地区有：渤海湾到莱州湾沿岸，江苏小羊口到浙江北部的海门、温州、台州等地区，福建宁德至闽江口，广东汕头到雷州半岛东岸及海南省北部沿海（冯士筭 1999）。风暴潮灾害严重的地区几乎都是我国经济发达、人口密集之地，一旦遭受潮灾，损失便十分巨大。在风暴潮灾害中，中国受到的台风风暴潮灾害最多。据统计：从 1949 年到 1998 年的 50 年中，共发生台风风暴潮灾害 125 次，平均每年 2.5 次。从 1989 年到 1998 年的 10 年中，平均每年损失

超过 100 亿人民币（杨华庭 1993，王喜年 2001）。中国有验潮记录以来的最大风暴潮是由 0216 号台风（森拉克）引起的，0216 号台风于 2002 年 9 月 7 日 18 时 30 分登陆浙江省温州市苍南县，登陆时近中心最大风速达 $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。受其影响，福建、浙江、上海沿海普遍出现了 100~300 cm 的风暴增水。从福建东山到上海高桥沿海有近 20 个验潮站超过当地警戒水位，其中浙江南部的鳌江站最大增水达 321 cm，最高潮位 690 cm，不仅超过该站有观测记录以来最高潮位（已超过当地警戒水位 130 cm），而且也超过中国有记录中 8007 号台风（Joe）在南渡引起的 594 cm 的最高潮位。

1.1.2 巨浪灾害

根据表 1.1 和表 1.2，巨浪引起的灾害仅次于风暴潮引起的灾害，是中国海洋灾害的第二大灾害。

海浪（ocean wave）通常指风浪和涌浪，是发生在海洋表面的一种波动现象。海面上的风是海浪的形成及发展成为海浪灾害的主要因子，因此风暴潮常常伴有巨浪。

海浪在海上主要给航海、海上施工、渔业捕捞和海上军事活动等带来很大的威胁，它能引起船舶横摇、纵摇和垂直运动。横摇的最大危险是如果船舶的自由摆动周期与海浪的起伏周期相接近时会出现共振现象而造成船舶的颠覆。剧烈的纵摇会使船舶的螺旋桨露出水面，致使机器运转工作不正常而失去控制。当海浪的波长与船舶长度相近时，由于船舶的自重，能使万吨巨轮拦腰截断。有时，海浪虽然不太高，但如果海上平台建筑物的自振周期与海浪周期相接近，也可以对建筑物造成毁灭性的破坏。1991 年美国 ACT 石油公司的一艘大型铺管船，在珠江口外海被 9711 号台风浪拦腰折成两截后沉没海底（陆渝蓉 1999）。

海浪到了近海和岸边，不仅冲击摧毁沿海的堤岸、海塘、港口码头和各类建筑物，还伴随风暴潮，沉损船只，并致使大片农作物受淹和各类水产养殖珍品受损。海浪所致的泥沙运动使海港和航道淤塞。此外，巨大的海浪冲到近海和岸边，对于海岸的压力可达到 $30\sim 50 \text{ t}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

海浪也是海难事故的最主要原因。近代研究表明，海上的破坏力 90% 来自海浪，仅 10% 的破坏力来自风。我们平常说的所谓“避风”，实际上是“避浪”，因为任何避风港和锚地都是避不了风的，而只能是避浪。

1.1.3 风暴潮、浪对海上军事活动的影响

海洋在国家政治、经济、文化和国防的重要战略地位，决定了海军建设和海上作战的重要性，而海洋环境对海战的准备、实施、进程和结果全过程都具有不可低估的影响。

热带气旋来临时，风暴潮有时会淹没港口附近的营区和军事设施。此外，大量舰船聚集在避风港口，在强热带风暴及其伴随的海流、漫滩和海浪的作用下，经常会发生碰撞、搁浅，甚至颠覆、沉没。第二次世界大战中，英美海军在诺曼底登陆，就曾由于一次不大的风暴损失 700 艘登陆艇。

风、海流和海浪都会使舰艇偏离航线产生漂移，这将影响舰艇定位精度和编队协同，也可能使舰艇传感器系统无法可靠地实施探测、跟踪和测距等一系列的作战活动。海洋环境对海军潜艇战和反潜艇战、水雷战、海上导弹作战、登陆作战、海上补给以及海上援助等都有极为重要的影响（李磊 2002）。

1.2 风暴潮和海浪的研究与预报状况

由 1.1 节可知，风暴潮、浪招致的海洋灾害是触目惊心的，因而引起了各沿海国家的广泛关注。许多科学家开展了风暴潮和海浪的科学研究，成为海洋科学和灾害学的重要研究领域。

1.2.1 风暴潮灾害的研究现状

对风暴潮的成因和过程研究始于 20 世纪 20 年代。在第二次世界大战以前，主要是对风暴潮个例进行观察和分析，了解其现象和过程，并对其形成原因进行初步探讨。战后，随着探测技术的进步，风暴潮研究进入一个新时期，这期间提出的边缘波、陆架波及天文潮和风暴潮的非线性耦合理论，以及与此同时进行的风暴潮的数值实验，使得人们对风暴潮的成因、机制和过程有了更深入的认识。现在已经知道，风暴潮的形成，主要是由风暴中心的低压及其周围存在着急速旋转的强气流引起的。

鉴于风暴潮的危害，科学家们很早就开始关注风暴潮的预报研究。早期

的预报主要是采用经验方法, 将影响风暴潮的因素与风暴潮位进行统计分析, 运用相关理论, 确定风暴潮位与影响因素变化之间的统计关系, 并给出这种关系的可靠程度和相关程度。具体地说, 就是在大量观测资料统计分析的基础上, 建立风暴潮位与海平面气压、风速和风向的相关关系。实践证明, 经验预报方法简单、操作简便、预报效果也相当不错, 所以迄今为止仍在许多国家和地区使用。

20 世纪 50 年代, 由于电子计算机的发展, 科学家们开始进行风暴潮数值预报 (numerical forecasting of storm surge) 研究。所谓风暴潮数值预报, 简单地说就是应用电子计算机求解风暴潮动力学模式。它是在数值天气预报的基础上进行的, 包括天气数值预报模式和风暴潮数值计算模式两个组成部分。首先是通过数值天气预报模式给出风暴潮计算所需的海上风场和气压场, 也就是做出大气强迫力的预报。然后根据海上风场和气压场, 在适当的边界条件和初始条件下, 求解风暴潮动力学基本方程组, 求得风暴潮位和潮流的时空分布, 即沿岸的风暴增水分布和特定地点风暴增水的时间变化 (过程曲线)。因此, 风暴潮数值预报的时效性和准确性, 很大程度上取决于数值天气预报的时效和准确性。德国科学家 W. Hanse (1956) 第一次应用电子计算机对北海的一次风暴潮进行了数值计算, 并获得初步成功, 开拓性地向数值预报迈出了第一步。随后, 其他国家也相继开展了风暴潮数值预报研究。在 70 年代, 日本的宫崎正卫、宇野木早苗、矶崎一郎等采用台风预报的多种模式计算结果互相对照来进行风暴潮预报。美国 Jelesnianski (1965, 1966, 1972, 1974) 对不考虑和考虑底摩擦的风暴潮进行数值计算, 建立了 SPLASH (Special program to list amplitude of surges from hurricanes) 模式。英国著名海洋学家 Heaps (1983) 提出自动化温带风暴潮预报方法“海模式 (Sea Model)”, 此方法以气象局 10 层大气模式, 每隔 12 h 发布连续 36 h 的海面风和气压预报, 输入一个二维流体动力学方程组作为外力, 计算出覆盖不列颠诸岛的大陆架逐时全过程风暴潮变化值。80 年代, 美国不断对 SPLASH 模式进行改进, 发展了新的风暴潮数值预报模式 SLOSH 模式 (Jelesnianski 1992), 这一模式能预报出海上、陆上, 以及湖上的台风风暴潮, 在防灾预报中发挥了很好的作用。

20 世纪 80 年代以来, 中国在风暴潮数值模式研究中也取得很大进展。已经完成了对渤海、黄海、东海和南海陆架海域风暴潮数值模拟实验, 并以此来研究各动力因素的效应, 渤海还采用了超浅海风暴潮三维模式进行数值

实验(孙文心 1979, 张延廷 1983, 吴培木 1981, 李树华 1992, 江毓武等 2000)。这些实验结果能够较好地阐明半封闭海、开阔海和曲折海岸的风暴潮机制, 并为风暴潮经验预报方法的因子选择提供了可靠依据, 有利于这类方法提高预报的精度。另外, 从 1987 年开始, 中美合作进行了 SLOSH 模式在中国应用的研究, 已完成雷州半岛和杭州湾(尹庆江等 1997) 两个计算域的 SLOSH 模式非漫滩实验。“七五”期间, 国家海洋环境预报中心完成了攻关课题“风暴潮数值预报方法研究”, 其中关于风暴潮模式和大气模式连接的业务预报方案颇具特色, 它除了做各海区部分不同天气系统诱发的风暴潮后报试验外, 还对渤海温带风暴潮和 1991 年几次台风风暴潮过程进行了实时预报检验。同一期间, 中国科学院海洋研究所等单位完成了国家重点项目“风暴潮数值预报模式(A)”(1991) 的研究任务, 进行了部分台风个例的预报检验; 中国海洋大学也完成了“风暴潮数值预报模式(B)”(1991) 的研究, 进行了个别温带和台风风暴潮个例预报检验。在“八五”攻关中(青岛海洋大学风暴潮研究小组 1996), 对风暴潮数值预报的一些关键技术进行了研究, 考虑到风暴潮与天文潮耦合效应在内的风暴增水, 采用了一个合理的非线性模式, 并增加一个可变边界的风暴潮动力学模型, 使在宽阔潮间带的区域预报风暴潮漫滩范围成为可能。近年来, 中国风暴潮预报水平有了很大提高。据统计, 预报时效平均为 12h 左右, 高潮位平均误差约为 25cm(苏纪兰 1998)。

1.2.2 海浪研究与预报

在实际海浪计算和预报方面, 研究人员提出了许多方法, 它们大致分为三类(许富祥 1993)。一是半经验半理论方法, 这是最早出现的方法。包括有效波方法、PNJ 波谱方法, 以及一些港口工程设计规范方法等; 二是直接从观测资料入手, 建立一些经验统计关系式; 三是海浪的数值计算和预报。建立在海洋学、流体动力学和数学紧密结合基础上的海浪数值预报始于 20 世纪 50 年代。目前的海浪的数值计算和预报方法, 基本上都是从谱组成波的能量平衡方程出发, 进行数值积分求得。由于所考虑的源函数不同, 还提出了很多不同的数值模式。归纳起来, 这些海浪数值计算和预报模式可分为三类。一是非耦合传播模式(Decoupled Propagation), 简称 DP 模式。这种模式假定每一组组成波独立地成长到充分成长谱, 与其他组成波无关, 也