

## 长江口水动力过程的研究进展(1979~1999)\*

### STUDIES ON HYDRODYNAMIC PROCESSES(1979-1999) IN THE CHANGJIANG RIVER ESTUARY

时 钟

(上海交通大学港口与海岸工程系 200030)

长江口是长江注入东海的入海口,自徐六泾以下经过3次分汊,共形成4个入海通道。长江口为中潮河口,口外潮汐为正规半日潮,口内为非正规半日浅海潮。长江口水动力的研究主要起因于:(1)海洋科学海陆相互作用中河口动力学的基础理论研究;(2)长江口深水航道的维持(整治、疏浚);(3)长江河口水环境、污染物处理的日益恶化;(4)长江河口淡水资源的开发利用。长江口水动力过程主要研究径流、潮流、波浪、柯氏力及沿岸流相互作用。长江口水动力情况复杂,径流、潮汐、波浪、柯氏力及沿岸流作用都较强烈,赵保仁1993年认为口外还受上升流影响。沈焕庭、潘定安1979年,Shen等1983年较早依靠现场观测手段对长江口水动力问题进行研究。此外,潮流、波浪的数学模拟也被广泛应用于长江口水动力研究。

在过去20多年中,长江口水动力过程研究成果大量来自河口海岸学家、物理海洋学家、海岸工程师、环境流体力学家的文献、著作。本文的目的是力图把这些文献(以正式发表的文献为准,不包括研究报告)汇集起来,对长江口潮流、余流、波浪、盐水入侵的研究进行总结,究竟我们对长江口水动力过程了解多少?究竟长江口水动力过程还有哪些问题值得研究?

#### 1 长江口余流、环流、水团、长江冲淡水

基于现场实测资料,胡辉等1985年对长江口外海滨余流的运动变化特性进行了一定的研究。研究结果表明:长江口外余流约为潮流的 $1/2 \sim 1/5$ ,上层余流以向东为主,中层余流多偏北,底层余流有偏西的趋势。径流是长江口外上层余流的重要组成部分,并以冲淡水的形式存在;中、下层余流则与台湾暖流的顶托和牵引有关。王康、苏纪兰1987年研究了长江口南港的横向环流、垂直环流及其对悬移质运输的

影响。在前人基础上导出了长江口相对观测层次的物质断面传输公式,增加了反映环流及振荡切变的各种相互关系的有关项。基于现场观测资料,Wang等1990年研究了长江口水团、长江冲淡水团等的基本特征。根据1996年长江口南港水道枯、丰水期大、中、小潮两次各26h的全潮水文实测资料,杨许侯等<sup>[1]</sup>统计分析了实测潮流的特征和潮流类型、运动形式、潮流垂直变化、余流、分潮对涨、落潮流不等的影响。崔茂常1984年,张庆华等1993年,朱建荣、沈焕庭1997年对长江冲淡水进行了研究。

#### 2 长江口潮流数学模拟

##### 2.1 平面二维数学模型

长江口水域开阔,口内多浅滩和沙岛,流场分布规律比较复杂。在长江口水域建立平面二维数学模型,有利于对长江口的水动力特性从宏观上加以研究。同时,河口平面二维数学模型的差分求解方法已比较成熟,且运算量相对较小。采用平面二维数学模型能够利用现有的计算设备,并在较短的运算时间内完成对长江口水域内流场平面分布特性的数学模拟。对平面二维数学模型的有限差分法中,ADI法由于其较好的稳定性且计算量相对较小,赵士清1985年,刘上煊、叶永1987年,韩丕康、黄国玲1987年,刘世康、徐建益1987年,刘上煊、陶学为1987年,王船海、程文辉1991年,徐建益、袁建中1992年,许朋柱、毛锐1993年,刘桦<sup>[2]</sup>等已将此法应用于长江口。此外,汪德等1987年用特征线法、破开算子法等差分

\* 国家自然科学基金资助项目49806005号和国家教育部跨世纪优秀人才培养计划基金资助项目[教技函(1999)2号]。

收稿日期:2000-06-18;修回日期:2000-07-14

方法进行长江口平面二维潮流数学模型求解。除有限差分法外,唐苓等 1992 年将边界元法用于平面二维数学模型的求解;易家豪、叶雪祥 1983 年;成安生等 1987 年采用有限单元法及限体积法等,赵士清 1985 年采用三角形网格,并将局部的有限元法和有限差分法结合起来,在保证计算稳定性的同时,减少了计算量。参照国外学者的方法,刘上煊、叶永 1987 年将长江口平面二维潮流方程分别划分为:动量平流项、水平动量扩散项以及波传播项。其中,动量平流项按特征曲线差分格式展开,水平动量扩散项按有限差分展开,波传播项采用隐式方向交替格式(ADI)展开。韩丕康、黄国玲 1987 年建立了长江口南支河段平面二维不稳定流计算的数学模型,着重长导堤整治工程情况下的数值解法。从二维不稳定流的基本方程和流体连续方程出发,在加权剩余的 Galerkin 方法上,成安生等 1987 年导出了长江口北支二维不稳定流的一种有限元数值计算模式。

利用平面二维数学模型,于克俊 1990 年计算了长江口夏季和冬季的余流。计算结果表明:(1) 无风条件下,由于地形的影响,长江口北支余流和北港余流由东转向东北;南港余流则指向东南再转向西南。(2) 有风条件下,夏季由于南风的影响,南港余流入海后由东转向东北;冬季由于北风作用,长江口海域余流指向东南再转向西南。采用富里叶分析将潮波分成各个分频率然后叠加,针对每一个频率,唐苓等 1992 年运用边界元技术用数值求解潮波控制方程,最后线性叠加,得到了长江口平面二维全场的水位和流速分布。许朋柱、毛锐 1993 年利用 Thompson 的数值网格生成技术,在长江口南支七丫口至横沙河段设计了一个椭圆型边界拟合坐标系,并在此坐标系下建立了平面二维潮流数学模型。应用有限差分法,谢军<sup>[3]</sup>对任意曲线坐标下长江口地区平面二维潮流数学模型进行了计算。该方法网格划分任意性大,能较好地拟合边界,边界条件处理简单计算效率高。利用平面二维斜压浅水波方程,并采用自适应网格的生成方法,刘卓等<sup>[4]</sup>采用自适应网格对长江口的平面流场进行了数值模拟,克服了均匀网格拟合边界的困难,得到了较好的计算结果。但他们未考虑动边界。

## 2.2 垂向二维数学模型

长江口南槽各参量横向差异较小,潮流主要呈往复流形态。在该区域,横向积分的垂向二维模式显然是合理的。基于潮流有限差分方程,黄世昌等 1994 年选用 Prandtl 混合长度理论处理涡动扩散和黏滞系数,同时考虑由盐度差引起的密度异重流,采用 Mink Anderson 的衰减函数来模拟长江口南槽的垂向

二维结构。模拟结果揭示了南槽既是涨潮优势流的转换地带,又是最大流速区。

## 2.3 三维数学模型

易家豪、叶雪祥 1983 年,赵士清 1985 年,宋元平等 1990 年,徐贵泉、褚君达 1992 年,刘子龙等 1996 年对长江口潮流三维数学模型进行了研究。根据潮汐非恒定流的三维运动方程和连续方程,运用有限差分和有限元相结合的方法,易家豪、叶雪祥 1983 年求解了长江河口潮汐河道中的三维流速分布和水位随时间的变化过程。求解时,平面上运用了 Galerkin 方法,采用具有三角形单元的有限元公式,垂直方向和时间上均采用有限差分公式。在垂直方向引进了无尺度坐标,从而解决了自由水面的计算。此外,考虑了柯氏力的作用,并将河床阻力作为边界条件。水体中的阻力根据 Prandtl 混合长度理论加以计算,并考虑了动量交换系数在不同方向上具有不同的量级。赵士清 1985 年提出了一个长江口潮流三维数学模型。在垂线上,水体被划分为 3 层。这样,长江口三维潮流问题被简化为求解一系列二维的问题。基本方程是用有限差分来近似。对于时间变量的偏导数采用显式格式,对于空间变量的偏导数采用中心差分。刘子龙等 1996 年对长江口潮流进行了三维数学模拟。他们采用了平面正交曲线坐标变换,垂向采用无量纲化变换,将整个计算区域变换成固定的规则区域,之后,选择合适的算子分裂,据每个分步算子的特性,构造各自合适的求解方法,选用了简单的零方程模型作为紊流模型。长江口盐、淡水的混合而产生的盐度分层流,水、泥沙的交换而形成的泥沙异重流;温度梯度变化形成的温度分层流。因此,长江口是一个分层流河口。采用  $k-\epsilon$  紊流模型封闭三维非恒定雷诺方程,徐贵泉、褚君达 1992 年对长江口北槽三维分层流进行了数学模拟,该模型较好地模拟了长江口北槽潮流结构和盐淡水混合特征。

## 3 长江口波浪场、台风暴潮的数学模拟

长江口的波浪以风浪为主,浪向频率与风向频率基本一致,季节性变化十分明显。春季盛行 SSES 浪,夏季盛行 SSE-S 浪,秋季盛行 NE-NNE 浪,冬季盛行 NNW 浪。涌浪以偏东浪向为主。朱慧芳等 1984 年认为口门地区多年平均波高为 0.9 m,平均周期为 3.7 s,在口门以内,多年平均波高为 0.35 m,平均周期为 2.4 s。以长江口区波浪实测资料为依据,何金林 1996 年对目前国内常用的风浪要素计算方法进行了比较分析,认为就目前资料条件下,最适合长江口区的、能满足工程设计要求的风浪要素计算方法为莆

田公式。以长江口深水航道整治工程为背景,陶建华等<sup>[5]</sup>对长江口大面积波浪场的计算方法进行了研究。他们应用抛物型缓坡方程模型计算了长江口整治工程前的波浪场,对长江口整治工程后局部复杂地形和工程结构物附近的波浪场用以 Boussinesq 方程模型为基础的“数值波浪水池”进行了细化研究。长江口台风风暴潮的数值模拟研究包括:计算模式、增水计算、潮波传播计算和预报模式,张君伦、盛根明 1987 年,盛根明 1987 年采用二维全流型方程组套用差分格式计算了长江口地区风暴潮,他们将口外区增水线性计算、口内区考虑增水与潮汐综合作用非线性计算。

## 4 长江口盐水入侵、混合过程

### 4.1 现场实验

沈焕庭等 1980 年对长江口盐水入侵进行了初步研究。根据自入侵源水域进行同步现场观测,关许为、顾伟浩 1991 年探讨了长江口咸水入侵问题。基于现场实验资料,茅志昌等 1993 年分析了长江口南岸南岸水域咸水入侵来源。茅志昌 1995 年就长江河口锋盐水入侵研究进行了探讨。

### 4.2 平面二维数学模型

从分析长江口实测水文资料出发,陶学为 1991 年采用正交曲线坐标下平面二维数学模型及特殊的线性同伦网格,对长江口海水入侵进行了研究。

### 4.3 垂向准二维数学模型

应用平板振荡边界层理论及波流分解方法,周济福等<sup>[6]</sup>导出了往复运动水流的流速垂向结构,建立了河口准二维盐度数学模型。他们应用此模型研究了长江口混合过程,并得到了盐度分布、盐度锋强度随长江径流、潮差定量变化的规律。

### 4.4 三维数学模型

宋元平等 1990 年建立了长江口外海滨盐度扩散的分层三维数学模型。模型是建立在一系列二维数学模型的基础上,它通过将水体在垂线上分成若干层,在每层水体上对流速进行平均处理,各层之间通过水体间摩擦阻力来连接。此分层三维数学模型客观地反映了长江口盐度分层现象明显的特征。计算结果表明,表层盐度变化较大,愈接近长江口口门,其变化愈大,分布很不规则,说明了长江径流和羽状锋对表层盐度分布影响较大。中、底层由于外海盐水楔向入侵,使得盐度分布相对稳定。匡翠萍<sup>[7]</sup>建立了长江口盐水入侵计算的三维数学模型。该模型将整个计算水域通过简单的坐标变换成单位方体,三个坐标方向的空间网格均采用非均匀网格,对变换后的控制方程进行差分离散,水平方向的空间项采用显式中心差

分,垂直方向的空间项采用隐式中心差分,三角方程用 TDMA 法求解,水位采用迭代计算以提高精度。

## 5 长江河口锋、盐度锋、羽状锋

Su 和 Wang 1989 年分析研究了长江口次级羽状锋在长江输运悬浮泥沙进入杭州湾中的重要性。Su 等 1992 年进一步分析研究了长江口次级羽状锋的特点和它在悬浮物质输移过程中的作用。基于河口锋面现场调查资料(1988~1991 年),胡方西等 1995 年分析了长江口盐度场及盐度锋,提出了由口门至外海纵向上存在着 3 级锋面:(1)长江河口口水与长江冲淡水的界面——长江河口锋;(2)长江口羽状流水与口外混合水的界面——羽状锋;(3)长江冲淡水的最外边缘——海洋锋。

## 6 长江口潮汐物理模型

为研究长江口深水航道整治工程实施过程中的水动力及其他工程技术问题,同时建立河口海岸工程科学研究基地,交通部在上海建造了长江口科学实验中心<sup>[8]</sup>,该中心包括大型潮汐模型<sup>[9]</sup>。此潮汐物理模型以长江口外开敞海区的旋转流为主要特点,使有关水域的潮流场达到与原型相似。

## 7 存在问题及展望

(1) 由于分层潮流与地形的相互作用,许多河口广泛存在着内波,长江口的内波研究尚无文献报道,今后能否加强这方面的研究?(2) 河口区域除主要受潮流影响外,波浪作用有时亦较强烈。在近几年来,河口波浪与潮流的共同作用愈来愈受到研究者的关注<sup>[10]</sup>,并在平面二维数学模型中加以考虑。严以新 1989 年,辛文杰 1997 年<sup>[11]</sup>在这方面取得了一定的成果。在长江口平面、垂向二维及三维数学模型中,如何考虑河口波、流相互作用(耦合)?(3) 近年来,人工神经网络也不断应用到水科学中,能否将其应用到长江口水动力过程研究中?(4) 长江口浅滩多,在过去的潮流数学模型中并没有很好地解决动边界问题。(5) 长江口水动力数学模拟结果的计算机可视化方面还应加强研究。(6) 究竟何种紊流模型适合长江口潮流的数学模拟?(7) 长江口水流的紊动扩散系数究竟如何选取较为合理?(8) 究竟何种计算网格较适合长江口潮流的数学模拟?(9) 刘宇陆 1995 年曾利用特征值理论和摄动方法研究了潮汐水流的垂向结构,此方法能否在长江口潮流研究中尝试?(10) 究竟长江口径流、潮流、波浪、异重流、沿岸流、地形如何相互作用?(11) 长江口水动力过程的现场实验、数学模拟和物理模型究竟相互衔接得如何?(12) 大型

编委·FORUM  
论坛 OF  
EDITORIAL BOARD

水利工程,如深水航道整治工程、围垦工程,究竟如何影响长江口水动力过程?程度和量级如何?

## 8 结论

本文对长江口潮流、余流、波浪、盐水入侵研究的主要进展进行了回顾总结。数学模拟已成为长江口水动力过程研究及应用的重要手段,今后应在以下几个方面加强进一步研究:(1)长江口深水航道整治工程势必对长江口波流场等产生影响,究竟对长江口水动力的影响程度如何?(2)在长江口水动力过程的数学模拟中,如何考虑河口波、流相互作用(耦合)?(3)整个长江口水域瞬时、连续的水深、流速、波浪、地形变化资料的获取技术和方法的改进,可以提高长江口水动力过程数学模拟精度。(4)风暴潮、台风等对长江口水动力过程的影响。

### 参考文献

- 1 杨许侯等。海洋通报,1999,18(1):1~11
- 2 刘桦。上海环境科学,1997,15(7):20~23
- 3 谢军。任意曲线坐标系下二维潮流数学模型。见:中国海洋工程学会编。第九届全国海岸工程学术讨论会论文集。北京:海洋出版社,1999。335~341
- 4 刘卓等。海洋学报,1999,21(4):96~105
- 5 陶建华等。浅水区大面积波浪场数值计算方法的研究。见:中国海洋工程学会编。第九届全国海岸工程学术讨论会论文集。北京:海洋出版社,1999。17~24
- 6 周济福等。中国科学,1999,29(9):835~843
- 7 匡翠萍。河海大学学报,1997,25(7):54~59
- 8 陈志昌等。水运工程,1999,309(10):60~66
- 9 王育林。水运工程,1999,309(10):102~103
- 10 刘应中、时钟。见:周哲玮(主编),湍流理论新进展及其应用。上海:上海大学出版社,2000。209~215
- 11 辛文杰。海洋工程,1997,15(1):30~47

(本文编辑:张培新)