

21世纪的长江河口 初探

Yangtze River Estuary in the 21st Century

陈吉余 主编



海洋出版社

21 世纪的长江河口初探

陈吉余 主编

海洋出版社

2009 年 · 北京

图书在版编目(CIP)数据

21 世纪的长江河口初探/陈吉余主编. —北京:海洋出版社,
2009.4

ISBN 978-7-5027-7340-3

I. 2… II. 陈… III. 长江-河口-文集 IV. TV882.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 050996 号

责任编辑:王 溪

责任印制:刘志恒

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编:100081

北京顺诚彩色印刷有限公司 新华书店发行所经销

2009 年 4 月第 1 版 2009 年 4 月北京第 1 次印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:15.25

字数:387 千字 定价:80.00 元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

序

世纪之交的20年(1990—2010年),长江河口恰逢浦东开发开放,上海建成经济、金融、贸易、航运4个中心新一轮发展时期所带来的机遇。一系列大型工程拔地而起,浦东国际机场兴建在海堤之外的滩涂上,深水航道在河口拦门沙从-7 m向着-12.5 m水深切进,一系列的促淤造地工程,使上海陆地围垦从+3 m以上高程(吴淞)下降到零米,甚至是-2 m高程,城市给水从黄浦江推向水质优良的长江口,在河口的江心正在兴建面积达到60余 km^2 的青草沙水库。沿江岸线布满了企业的码头,人类驱动力在河口地区平面形态的改造必然也使得河口动力场也带来相应的改变。随着龙头开发,带动中西部长江沿岸城市乃至整个长江流域社会经济进入新一轮发展的新阶段,工业化、城市化、以及农业的发展既对长江水资源需求飞跃地增求,与此同时也增加了污染物质通过长江排向河口的巨大增量。尤其令人关注的宏伟的长江三峡工程,在这个20年里,经过论证的通过,大坝浇筑截江耸立,135 m和156 m高程蓄水相继于2003年和2006年完成,175 m的蓄水高程即将实现。南水北调中线和东线工程相继实施,并渐臻全系统的完善。

河口是流域的终端,河口是流域的脉搏。流域水沙的调节必然也在河口过程进行相应的自适应。这些适应的现状如何?发展趋势如何?这些适应与河口对其本身系列工程适应发生的变化,它们与流域水沙变化响应发生的共振又将如何?这是大家都很关注的问题,因为它既影响于资源(水、土、水运、水产……)发展的趋势,也对环境、生态产生强势影响。这种影响是正面的还是负面的,对长江河口现状的认识以及趋势性的认识都是迫切需予了解的,特别是当长江河口综合整治规划即将实施的时候,对于不断变化着的长江河口应该如何应对更是需要予以深入认识的。

基于此,华东师范大学的研究人员出于社会责任感,对进入21世纪的长江河口现状的有关问题作了初步探索,根据研究所得组织撰写,汇编成册,以供关注于长江河口者们参考指正。

本书在编写过程中,张经院士具体负责内容配置、章节协调、集稿程序,并审阅第一部分稿件;王平、程和琴负责院内编辑整理工作。经过参写专家的努力,本书得以如期完成。为此,予以深切感谢!

陈吉余

2009 年 3 月于上海

目 次

第一部分 长江河口研究现状与面临的问题

- 1.1 河口的界定:河口的定义与长江河口区分段 茅志昌(3)
- 1.2 河口水文 杨世伦(5)
- 1.3 河口物理过程 朱建荣(8)
- 1.4 河口泥沙 何青(15)
- 1.5 长江河口河槽 徐海根等(19)
- 1.6 长江河口化学物质的含量与变化特点 张经等(42)
- 1.7 长江口的资源开发与环境保护 李道季(46)

第二部分 目前长江口研究的若干热点问题

- 2.1 进入 21 世纪的长江河口悬移质泥沙及三峡蓄水和流域特枯水情的影响
..... 何青等(55)
- 2.2 三峡工程对长江河口盐水入侵的影响 朱建荣(74)
- 2.3 滩涂湿地资源的动态变化 茅志昌(96)
- 2.4 长江口河势及整治 金镠等(103)
- 2.5 近期长江口外水下三角洲的冲淤变化 李鹏等(119)
- 2.6 长江口北支河床演变过程中人为驱动效应 程和琴等(128)
- 2.7 河口地区河流健康及水系结构保护 杨凯(149)
- 2.8 三峡工程与长江口的生源要素输运 张经等(154)
- 2.9 近十年来长江口浮游生物种群结构的演变 李道季(168)
- 2.10 河口城市化进程中城市环境的时空变迁 汪军英等(185)
- 2.11 上海城市“近自然型”生态建设的理论与实践 达良俊等(202)

第三部分 长江口生态系统的和谐发展与自然适应

- 3.1 长江河口健康的胁迫因素及监测与评价 陈小勇(219)
- 3.2 长江口湿地的生态建设 陆健健(230)
- 3.3 21 世纪长江河口发展道路初探 陈吉余等(233)

第一部分

长江河口研究现状与面临的问题^①

^① 本部分中,第1节由茅志昌执笔,第2节由杨世伦执笔,第3节由朱建荣执笔,第4节由何青执笔,第5节由徐海根、虞志英执笔,第6节由张经、吴莹执笔,第7节由李道季执笔。在本部分中作者的署名不再于各节一一列出。

1.1 河口的界定:河口的定义与长江河口区分段

1.1.1 河口的定义

河口系指河流与其受水体相结合的地段。受水体可能是河流、湖泊、人工水库或海洋,因而根据受水体的不同,河口又可分为支流河口、入湖河口、入库河口以及入海河口等多种。

入海河口因其区域的重要性、资源的丰富性、动力条件的复杂性,无论在国民经济建设上或科学理论上,均具有极为重要的意义。

对于入海河口的定义,原则上可以认为,它是河流与海洋结合的地段,既包括受到海洋因素影响的河流下段,也包括受到河流因素影响的滨海地段。然而由于不同学科的专家从不同专业角度对入海河口下定义,已见到的不下 10 多种,其中有些定义的范围比较广,有的定义的范围则比较窄。分歧的原因主要在于,河水与海水具有极不相同的动力性质、化学性质、热力性质和其他性质。如从动力性质看,河流中是径流,海洋中是潮流和海流,河口可视为径流与潮流相互作用的区域,上界应为潮汐影响的上界——潮区界,下界为径流在海洋中扩散的末端;如从化学性质看,河水是淡水,海水是盐水,河口可视为盐水与淡水交会的区域,上界应为盐水入侵的上限,下界应为冲淡水影响所及的位置(华东师范大学河口海岸研究所,1982)。

在多种河口定义中,国外目前用得比较普遍的是美国学者普里查德(D. W. Pritchard, 1967)对河口的定义。他认为“河口是一个半封闭的海岸水体,它与外海自由相通,河口中的海水受到来自陆地径流的淡水明显冲淡”。按照普里查德的定义,河口的上界应是盐水入侵的上界,下界在定义中不甚明确,有的认为在口门,有的认为在冲淡水扩散的外边界。

1.1.2 长江河口区分段

前苏联学者萨莫伊洛夫(И. В. Самойлов, 1952)根据河流情势与海洋情势的优势情况,将河口区划为 3 段:河流近口段、河流河口段和口外海滨。

黄胜等(1963)根据咸水界的变动情况将河口区分成河流段、过渡段和潮流段 3 个区段。以多年平均枯水大潮和多年平均洪水小潮的咸水界为上下极限,在咸水界下极限以下的河段,潮流作用较强,称潮流段;在咸水界上下极限之间的河段,径流与潮流两种力量强弱转换不定,称为过渡段;在咸水界上极限以上的河段,以径流作用为主,称河流段。

本文认为,长江河口区的分段有广义和狭义两种(图 1.1.1)。



图 1.1.1 长江河口范围和分段示意图

从广义上讲,长江河口由 3 个区段组成:大通至江阴,河槽演变受径流和边界条件控制,为近口段;江阴至口门(拦门沙滩顶),径流和潮流相互消长,为河口段;自口门向外至 30~50 m 等深线附近,水下三角洲发育,为口外海滨。

自 20 世纪 50~70 年代徐六泾节点形成以后,徐六泾为长江河口一级分汊的起点,又是弱潮河段与中潮河段的分界点,作为长江河口段的上界。河口段下界为拦门沙浅滩滩顶附近。长江河口存在拦门沙堆积体,它横亘在启东嘴和南汇嘴之间。本文即以此为狭义的长江河口。

1.2 河口水文

长江是世界级大河之一,其长度居世界第三、径流量和输沙率居世界第四(Zhao *et al.*, 2000; Eisma, 1998)。根据大通站资料,长江多年平均径流量和输沙率分别为 $897 \text{ km}^3/\text{a}$ (1950—2007 年)和 $4.02 \text{ 亿}/\text{a}$ (1951—2007 年)。

1.2.1 流域入河口径流量的变化

大通站的径流量监测始于 20 世纪 20 年代,但连续的径流量资料始于 1950 年。汉口的径流量监测始于 1865 年,仅在 20 世纪的 40 年代中期有短暂的缺失。根据宜昌与汉口以及汉口与大通站的年径流量相关关系,可以重建 1865 年以来大通站的年径流量过程线。如图 1.2.1 所示,大通站的径流量年际变化明显,最大和最小年径流量分别出现在 1954 年($1360 \text{ km}^3/\text{a}$)和 1900 年($553 \text{ km}^3/\text{a}$)。这种年际的波动主要与气候变化有关。从统计角度,1865 年以来的大通径流量呈微弱的下降趋势($P < 0.05$),下降率约为 $6\%/(100 \text{ a})$ (Yang *et al.*, 2005)。这一下降趋势可能主要与人类活动有关。长江流域的人口从 1890 年的 1.55 亿 km^3 增至 2001 年的 4.4 亿 km^3 。随着人口的增加和城市化、经济的发展,耗水量增加。同时,大量水库的修建(朱鉴远,2000)也拦截了一部分径流(Yang *et al.*, 2005)。

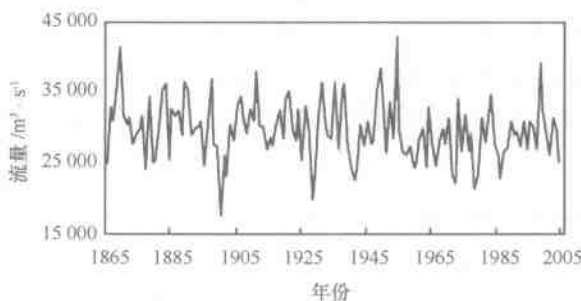


图 1.2.1 大通站年径流量事件过程线

20 世纪上半叶之前的数据是根据大通—汉口两站的径流量关系重建(Yang *et al.*, 2005)

受季风的影响,长江流域的降水量呈明显季节性变化。平均而言,最大和最小月降水量分别出现在 6 月和 12 月。降水量的季节性变化导致入河口径流量的季节性变化。由于水体在流域的滞留时间,平均而言,长江入河口月径流量的最大和最小值分别出现在 7 月和 1 月,前者是后者的 4.5 倍(图 1.2.2)。具体而言,各年的情况有所不同,最大流量可出现在 6、7、8、9 月,最小流量可出现在 12、1、2、3 月。

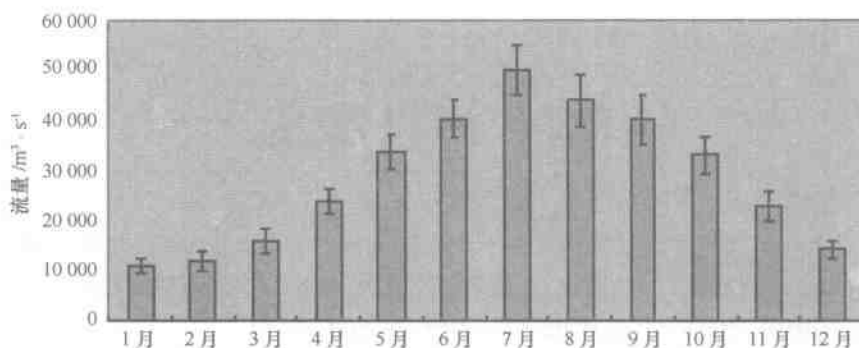


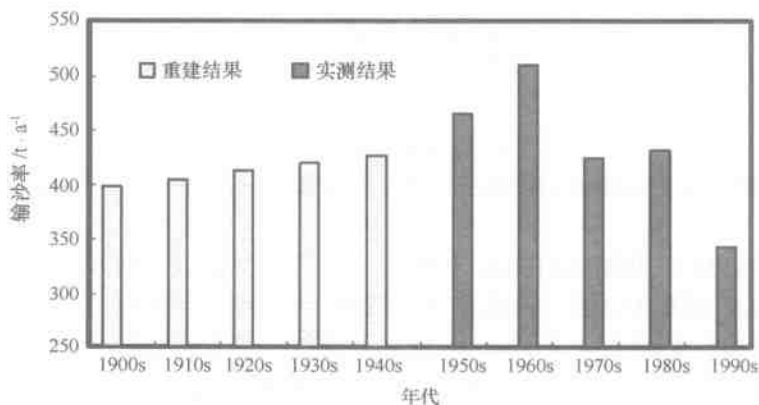
图 1.2.2 大通站多年平均各月流量

据长江水利委员会监测资料

1.2.2 流域入河口输沙率的变化

长江入河口泥沙绝大部分 (>98%) 是悬沙。由于这个原因以及通常缺失推移质资料, 悬沙通量往往被用来代替输沙率 (Yang *et al.*, 2002)。

长江大通站输沙率监测始于 20 世纪 50 年代。根据流域植被覆盖面积的变化和降水/径流条件可尝试反演此前的入河口输沙率。图 1.2.3 表明, 长江入河口输沙率在历史上经历了由逐渐增大到锐减的过程, 20 世纪 60 年代是历史上输沙率最大的年代。此前, 输沙率随着流域植被覆盖率的下降而增加; 此后, 水库修建造成的截沙效应超过水土流失造成的增沙效应, 入河口输沙率降低 (Yang *et al.*, 2002)。特别是 2003 年三峡工程蓄水以来, 60% ~ 70% 的上游来沙被拦截在库内, 尽管坝下游河床冲刷再悬浮补偿了一部分泥沙, 但入河口输沙率 (相对于三峡水库不蓄水而言) 仍下降了 1/3 左右。2006 年, 在流域大旱和三峡水库二期蓄水等因素综合影响下, 大通输沙率创 0.86 亿吨的极低值 (图 1.2.4)。

图 1.2.3 20 世纪各年代大通站平均输沙率 (前 50 年为重建值) (Yang *et al.*, 2004)

受径流量年际波动的制约,大通站输沙率也呈明显的年际波动现象。多数情况下,输沙率的年际波动与径流量的年际波动同步。大通站输沙率的季节性变化(图 1.2.5)较之流量的季节性变化更加明显。如图 1.2.5 所示,7 月平均输沙率是 1 月平均输沙率的 32 倍。



图 1.2.4 大通站年输沙率过程线(1951—2007 年)

据长江水利委员会监测资料

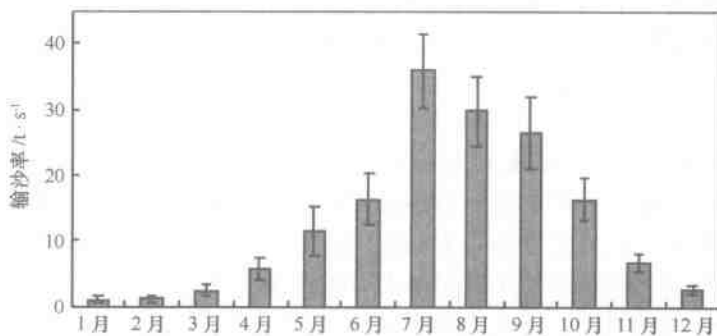


图 1.2.5 大通站多年平均各月输沙率

据长江水利委员会监测资料

1.3 河口物理过程

1.3.1 作用于河口水体微团的力

河口物理过程,主要包括流、浪和潮,其他还包括盐水入侵和泥沙输运等。从动力学角度看,河口物理过程受压强梯度力、科氏力、表面风应力、底部摩擦力和水体内部湍流产生的雷诺应力控制,它们的合力满足牛顿第二定律。

河口水体为流体,与刚体不同,牛顿第二定律应用需要满足流体连续介质假设,即认为真实流体所占有的空间,可近似地看成是由“流体质点”连续地无空隙地充满着。

水平压强梯度力包括两项,一项由水位坡降产生的,不随水深变化,称为正压压强梯度力,物理意思是在同一水平面上两点处单位面积水柱因高度不同所承受的重力不同,水位高的点水柱重力大,压强梯度力指向水位低的点。水往低处流、河流径流入海和潮流即由正压压强梯度力产生;另一项是由水体水平密度不均产生的,它随水深的增加而增加,称为斜压压强梯度力,物理意思是即使在同一水平面上两点处水位相同,若水体密度不同,密度高的点处单位面积水柱重力大,同样可产生指向密度低处的水平压强梯度力。在河口造成密度水平不均的主要原因是咸淡水混合产生的盐度水平变化,其他泥沙和温度的水平变化也会造成密度的水平差异。在口门附近斜压压强梯度力往往是动量方程中主要的项,它驱动产生的流称为热盐环流或异重流,在河口口门处指向河口上游。不管是正压压强梯度力,还是斜压压强梯度力,本质上均是同一水平面上单位面积水柱所受重力不同产生的,河口水流主要是由水平压强梯度力驱动的。

人是随地球一起旋转的,因此人所观测到的河口水体流动,是在旋转坐标系中观测到的现象,而牛顿第二定律需在惯性坐标系中才能成立。科氏力是牛顿第二定律在随地球旋转坐标系中应用而产生的,在北半球指向右侧,这就是它的物理本质。在河口由于水平空间尺度较小,科氏力相对于压强梯度力和摩擦力是个小量。所以,河口动力学与大洋动力学很不相同,前者是小尺度、非线性和非地转平衡的,后者是大尺度、线性和地转平衡的。

表面风应力和底部摩擦力是作为水平动量方程表面和底部边界条件引入的,分别与风速和水体流速成二次律的关系。对河口水体,表面风应力输入能量,底部摩擦力损耗能量。

在河口,水平雷诺应力一般很小,而垂向雷诺应力较大,体现了浅海动力学的特点。垂向雷诺应力与垂向湍流黏滞系数相关,需由湍流闭合模型确定。垂向湍流黏滞系数越大,流在垂向上越趋均匀。底部的潮流摩擦和表面风的搅动,加大了垂向湍流黏滞和混合系数,使水流和盐度、泥沙等物质垂向分布趋于均匀。

上述河口水体微团受力分析适用于大小河口,包括像长江河口这样的特大型河口。

1.3.2 河口水流

河口水体的流动(水流)包括潮流和余流。余流为总水流中扣除周期性的潮流后所剩余部分,是一种有相对稳定速度的非周期性流动。余流是相对于潮流而言的,在大洋潮流极小,在水流的研究中并不考虑,总流场称为环流。故从总物理意义上说,余流和环流表示的是同一个意思,即不含潮流的水流。

在河口和近海地区,经久不息的运动是潮汐潮流,潮流的量值在海水的流动中占绝对优势。但潮流为周期性的运动,仅在一个潮周期内对物质输运起作用,而对物质的长期输运而言,所起的作用并不大。它所起的作用主要是潮混合及潮致余流所产生的定向输运。余流量值尽管一般比潮流小,但在长时间尺度的流动中,对物质的输运起着十分重要的作用。潮流在和余流联合作用下,可对河口底部物质再悬浮、定向输运起重要作用。

河口余流主要由径流、热盐环流(异重流)组成,其他还有风生流和潮致余流。径流向海,洪季河流的径流量大,则河口入海径流大;枯季河流径流量小,则河口入海径流小。潮滩上径流小,河槽中径流大。河口热盐环流主要由盐度水平差异产生,在口门拦门沙处一般存在着盐度锋面,会产生强的随水深增强的向陆斜压压强梯度力,导致向陆的热盐环流,并随水深而增加。正由于热盐环流的存在,造成在河口口门处总余流垂向产生强烈的切变,若径流量小盐度锋面强,则可出现底层向陆的流动(图 1.3.1)。由于总的入海径流量需保持连续,底层向陆的流动必然导致表层向海的流动大幅增大。

由表面空气流动拖曳河水产生风生环流,依靠水体内部黏滞阻力向下传递,故风生环流流速随水深增加而减小。与大洋风生环流不同,因河口水深太浅(相对于大洋几千米深水),河口风生环流方向基本与风向一致。对特大分汊河口,如长江河口,会产生大范围水平横向环流(图 1.3.2)。长江河口冬季盛行北风,口外陆架向岸的 Ekman 输运导致北支、北港向陆,南港、南槽和北槽向海的横向水平风生环流。这种横向环流对各汉道的动力过程会产生显著的差异,如加强了北支和北港的盐水入侵,减弱了南港、南槽和北槽的盐水入侵。

由于地形的显著变化和潮差与深水数值大小上的可比性,河口潮致余流较为明显,它是由潮流和水深的非线性相互作用产生的。

总的长江河口环流由上述各成分组成,径流最为显著,在口门盐度水平变化显著的地方底层热盐环流趋于明显,出现向陆的环流(图 1.3.3、图 1.3.4)。

长江河口潮流为往复流,受口外潮波的控制(图 1.3.5、图 1.3.6)。因径流作用和水位变化,在绝大部分区域落潮流大于涨潮流,落潮流历时大于涨潮流历时。潮流具有季节、半月大小潮和日涨落潮周期变化。对长江河口,2~3 月和 8~9 月潮差大,潮流强;半月大小潮变化十分显著,且前后两个大小潮潮差和潮流具有较明显变化;一天之中的两次涨潮和落潮(半日潮)日不等明显。

1.3.3 河口盐水入侵

河口盐水入侵是河口的一种普遍现象,对淡水资源利用来说是一种海洋灾害。它受

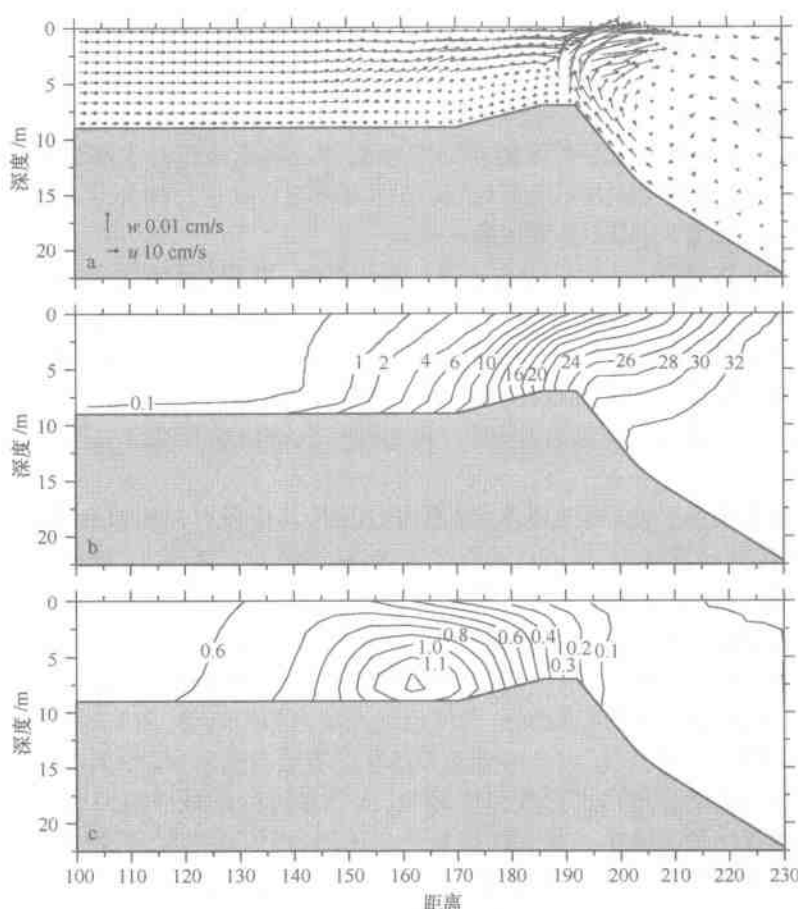


图 1.3.1 沿理想河口纵断面流场(a)、盐度(b)和泥沙(c)的分布

径流量、潮汐潮流、地形、混合、风应力、科氏力和口外陆架环流等的作用,具有显著的时空变化。如对长江河口,除受一般河口盐水入侵作用外,还受北支盐水倒灌的作用,使南支盐水入侵动力过程尤为复杂。长江河口盐水入侵空间上具有纵向、横向和垂向变化,时间上具有年际、季节、大小潮半月和涨落潮半日变化。北支由口外向口内盐度逐渐降低,南支因有北支盐水倒灌和外海盐水入侵二个来源,故在纵向上由口外向口内先减小、后增加、再减小,大潮期间呈两头高、中间低分布。北支、北港、北槽和南槽 4 条入海汊道在同一个横断面上其盐度的大小主要取决于径流分流量的大小,大则低,小则高。现在盐度分布状况是北支 > 南槽 > 北槽 > 北港。受科氏力作用,同一汊道的盐度是北岸大于南岸(图 1.3.7)。长江河口盐度的垂向变化主要取决于盐淡水的混合类型。口门附近,盐淡水混合以部分混合型为主,表底层盐度差值较大,底层盐度明显高于表层,出现盐水楔现象。在南支上段靠近北支上端附近,因北支盐水常呈楔形倒灌入南支,盐度的垂向变化也较大,底层盐度明显高于表层。在时间上,年际变化为丰水年盐度低,枯水年盐度高。季节变化为洪季(5~10 月)盐度低,枯季(11 月~翌年 4 月)盐度高,7 月盐度

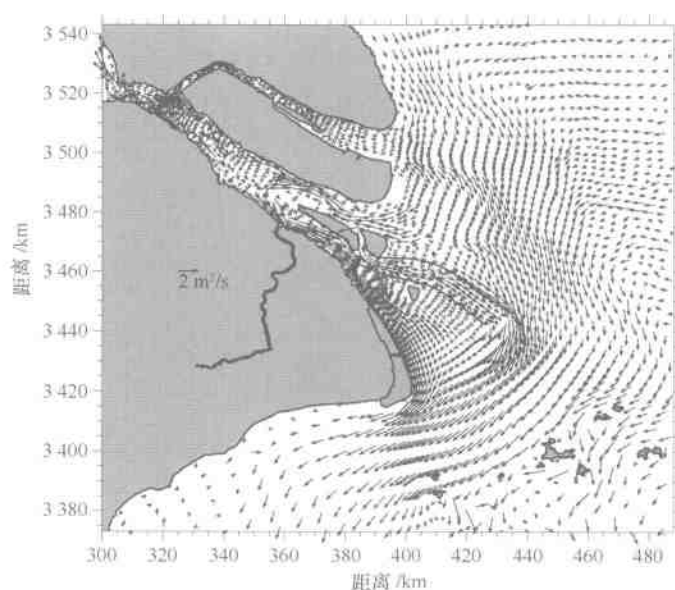


图 1.3.2 长江河口枯季在北风 6 m/s 作用下表层风生环流分布,由表示水体运输的单宽余通量表示

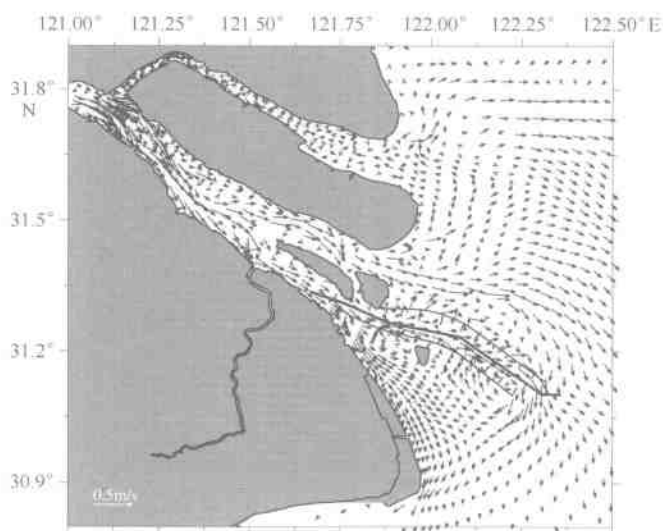


图 1.3.3 冬季小潮期间表层余流

最低,1~2月盐度最高。大小潮变化基本上可分二种类型,一种是以外海盐水直接入侵为主的是大潮盐度比小潮大,如北支、北港下段、北槽和南槽;另一种是主要受北支盐水倒灌影响为主的,小潮或中潮盐度比大潮大,如宝钢、陈行水库等。涨落潮变化与大小潮变化相似,也是基本上可以分两种类型,一种是以外海盐水入侵为主的涨潮盐度高于落潮;另一种是以北支倒灌为主是落潮盐度高于涨潮。影响长江河口盐水入侵的主要动力