



长江口锋面研究

Studies of Fronts
in the Changjiang Estuary



5

胡方西 胡 辉 谷国传 等◎著

华东师范大学出版社

上海科技专著出版资金

长江口锋面研究

Studies of Fronts in the Changjiang Estuary

胡方西 胡辉 谷国传等著

华东师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

长江口锋面研究/胡方西等著. —上海:华东师范大学出版社, 2002

ISBN 7-5617-2836-0

I. 长… II. 胡… III. 河口—锋—研究—长江
IV. P732.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 097204 号

长江口锋面研究

著 者 胡方西等

责任编辑 金庆祥

封面设计 卢晓红

版式设计 蒋 克

出版发行 华东师范大学出版社

市场部 电话 021-62865537

传真 021-62860410

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

社 址 上海市中山北路 3663 号

邮编 200062

印 刷 者 上海新文印刷厂

开 本 787×1092 16 开

印 张 9.25

插 页 1

字 数 220 千字

版 次 2002 年 4 月第一版

印 次 2002 年 4 月第一次

印 数 1500

书 号 ISBN 7-5617-2836-0/P·007

定 价 26.00 元

出 版 人 朱杰人

(如发现本版图书有印订质量问题,请寄回本社市场部调换或电话 021-62865537 联系)

推動科技出版事業
提高學術研究水平

為「上海科技書出版資金」題

徐匡迪

二〇〇〇年十月十一日

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪,科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略,上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”,资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

序

最近,抽空看了华东师范大学出版社送来的《长江口锋面研究》书稿,作者希望我为该书写个序言,我想这也是义不容辞的,因为我一直很关心河口锋的研究,它也蕴含着我的一片心血。

长江口的锋面活动引起我的注意,可以追溯到四五十年以前,不过当时还没有“河口锋”之类的名称。记得在 20 世纪 50 年代,我经常乘海轮进出上海港,每当船只航行于长江口附近,只要是白天,我总习惯地站在甲板上眺望大江、大海,此时水面上常有一种特殊的景观收入我的眼中,即在一望无垠的洋面(江面)上,一侧呈现蓝澄澄的清水,另一侧则是混沌沌的浊水,徐徐地移动着,蔚为壮观又似乎有些令人不可捉摸,给我留下颇为深刻的印象。以后我带领学生在长江口、杭州湾一带开展调查,又经常在近岸水域隐隐地看到一条水线,或泡沫带,在涨落潮的不同时刻,时而出现、时而消失,当地的船民称之为“流隔”。这种特殊现象在我以后数十年的河口海岸研究生涯中,一直占据在我的脑海之中,想弄个水落石出。只是于 50、60 年代,我国河口海岸研究刚刚起步,长江口有许多研究工作要做,大量关系到国家经济建设的实际问题急待解决,围绕长江口航道治理、港口建设、滩地围垦、护岸保滩等方面工作都必须优先考虑,使我只能把更多的精力放在搞清河口水流和泥沙运动、拦门沙形成、河槽演变、水下三角洲发育等方面的研究上,有关“锋面”的科研工作无暇顾及,只能暂时放到以后再说。

70 年代末至 80 年代初,河口锋研究在国际上受到了重视。陆续有一些研究报道和文章见诸于学术期刊上,我的国外同行 M·J·鲍曼等于 1977 年在纽约还召开了一次有关海洋锋的专题讨论会,与会的海洋科学家估价了当时海洋锋研究现状,提出开展海洋锋(包括河口锋)的研究方法和存在问题,并宣读了这方面的论文。特别指出对锋面物理过程研究应该同生物学、化学、沉积学相结合。由此可见,当时国际上对河口锋研究也起步不久,但它对我们今后开展工作打开了很好思路,也为我们达到和赶超这一领域的国际水平提供了机会。

1988 年我主持了“中国河口主要沉积动力过程研究及其应用”项目的研究,这是海洋界首批列入国家重大自然科学基金的大项目,它是经多年酝酿才获准的。我经过深思熟虑将河口锋和最大浑浊带作为该项目的两个分课题,以长江口为重点研究区域;另外两个分课题是以黄河口为重点的水下底坡不稳定性研究和以珠江口为重点的陆架水入侵研究。四个分课题从不同的侧面来探讨、研究中国河口沉积动力过程的基本特点,代表了 80、90 年代国际上河口研究前沿领域。我把“河口锋研究”课题交给了胡方西教授负责,由他组织华东师范大学河口海岸研究所和所外当时一批精干的科研人员开展工作。从搜集国内外的信息资料、进行多次大规模河口锋海上综合调查,一直至室内分析、编写报告,历时 5 年,他们发挥了集体的智慧,很好地贯彻了总项目的要求及我的意图,并能把河口水文、河口生物、化学和沉积等学科相互渗透来考察各种锋面现象,因此该项研究达到了预期的目标。

本书是在“河口锋研究”课题完成基础上撰写成的,是集体研究的结晶。作者是课题负责人和主要参加者,长期从事河口海岸研究,对长江口有较深的感性认识和经验积累。综观该书,它是作者理论与实践相结合的成果,填补了长江口在这一领域研究中的空白。书中系统和全面地介绍了长江口各种锋面的特点,进行了分类,深入探讨了羽状锋、近口锋、流速切变锋的水文、化学、生物特征及沉积过程。书中提出了一些新的观点和新的见解,尤其是关于河口锋在长江河口沉积动力过程中的作用有了新的认识,因而对拓宽我国的河口海岸研究方向是很有意义的。全书内容丰富,条理清楚,作为一本专著读后会使人有所裨益,我想这也是作者撰写该书的初衷。当然,这本书并非尽善尽美,有些分析还不够深入,也会有值得探讨和商榷之处,我想这是正常的。因为存在于长江口的各种自然现象,其物理、生物、化学和沉积过程都是动态的,不断变化的,随着高、新技术的发展和研究手段的不断改进,人们对它的认识会不断深化和细化,河口锋研究也必然如此。最后,我希望通过这本书的出版,能有助于河口海岸学术研究的不断繁荣。

陈吉余

前 言

本书是在国家自然科学基金会资助的重大基金项目“中国河口主要沉积动力过程研究及其应用”所属的课题——“河口锋研究”所取得的成果基础上撰写的,也是对该课题全面系统的总结。

河口锋是河口环境中的一种重要现象,它通常是指存在于河口地区的两个不同性质水体或水团之间的界面,界面附近往往存在一种或多种水文、化学要素的最大梯度,如盐度、温度、泥沙和密度等,而锋的形成则是在能量的积聚或衰减过程中实现的。河口锋的存在对河口地区的悬沙输移、沉积过程、生物地球化学过程有着十分重要的作用,并深刻影响着河口及相邻海域的环境。

长江全长约 6 300 千米,源远流长,作为中国最大河流,在其河口形成了特有的水文环境,主要可以概括为:(1)入海径流量丰富,年径流总量约 $9\,240 \times 10^8 \text{米}^3$,约占我国各河口入海径流总量的 57%。(2)入海沙量巨大,据统计长江多年平均输沙量为 4.86 亿吨,其中约有一半沉积在口门地区,其余扩散至口外,发育了巨大的长江水下三角洲,也是杭州湾和浙江东南沿海细颗粒泥沙的重要来源。(3)长江口是一个中等强度的潮汐河口,平均潮差约 2.5 米,口门地区涨、落潮流相当显著,它导致各种水文、化学和其他要素与潮汐相对应的时空变化。(4)河口地区盐水入侵现象明显,在涨、落潮和由纵向盐度梯度引起的河口环流作用下,外海盐度较高的水体向河口上溯,而河流淡水向河口下泄和扩散,这种盐淡水的交汇对细颗粒泥沙的聚集和沉降,对河口过程有重要作用。(5)巨量径流出长江口后,成为江浙沿岸流的最重要部分,它与台湾暖流、黄海暖流、苏北沿岸流等构成了范围更广的东中国海区的气旋性环流系统。

河口锋在这样的水文背景下形成,它对河口生态环境及河口沉积动力过程中所起的作用日渐被人们所认识。早在 20 世纪 60 年代,毛汉礼等对长江冲淡水进行过较系统的分析。70 年代末,人们开始对长江口的锋面进行了描述和研究。如 1979 年~1982 年中美海洋科学家在东海陆架沉积动力调查中对长江口的羽状锋作了初步调查;1984 年我国一些海洋工作者先后根据 1958 年~1984 年长江口标准断面调查资料,对东海西北部水温、盐度结构及锋面现象作了探讨;在 1985 年中法联合长江口调查中,分析了长江口羽状锋区的生物化学过程;1987 年~1989 年苏纪兰等在杭州湾锋面研究中又提出了长江冲淡水的次级锋面概念。

“河口锋研究”作为“中国河口主要沉积动力过程研究及其应用”这一国家基金项目的组成部分,我们从 1988 年起对长江口进行了多次综合调查,其内容涉及到锋面及其周围水域的水文、沉积、化学、生物等多个领域。本书集中反映了河口锋调查的主要研究成果,即从不同学科、不同侧面反映长江口锋面特征,力图能系统地阐述长江口主要锋面特征及其沉积动力过程。通过本书的出版,作者企盼为中国河口学研究作出微薄的贡献。需要指出的是调查研究

阶段和本书撰写过程中我们得到了国家自然科学基金委地球科学部和海洋学科的有关领导热情关怀和指导;项目总负责人陈吉余教授对本课题及本书的出版给予了具体指导和许多帮助,沈焕庭教授也给予我们许多指导,项目其他课题组的研究成果也给了我们很大的启发。

河口锋研究还得到中国水产科学院东海水产研究所、国家海洋局东海分局和上海港务局上海港引航管理站等单位的大力支持。东海分局、海洋局第四海洋调查大队和“海监 42 号”调查船为河口锋海上调查提供了船只,并协助制定调查实施方案。上海港务局上海港引航管理站无偿提供“引水 2 号”和“引水 3 号”作为长江口定位观测的调查用船,使我们获得宝贵的定位观测资料。中国水产科学院东海水产研究所、东海分局环境监测中心、上海计算技术研究所等单位在河口锋调查中进行了卓有成效的合作。对此,谨向有关单位致以诚挚的感谢。

最后,必须强调指出的是本书是“河口锋研究”课题组的集体成果,它包含和融入了每个参加者的研究成果和心血。其中有刘苍宇、田汝成、朱慧芳、曹沛奎、严肃庄、汪思明、宋元平、华棣、吴立成、周菊珍、胡嘉敏、韩明宝、杨焦文、孟翊以及东海水产研究所陈亚瞿、顾新根、沈新强、徐兆礼等,还有一些其他同志;本书由王佩琴同志清绘插图。由于笔者水平有限,不足之处希望读者能提出宝贵意见。

胡方西 胡 辉 谷国传

目 录

第一章 绪 论

1.1 河口锋研究的意义	(1)
1.1.1 海洋锋的研究概况及分类	(1)
1.1.2 河口锋的分类	(2)
1.1.3 河口锋研究历史及现状	(3)
1.1.4 河口锋研究的重要意义	(4)
1.2 长江口锋面研究	(4)
1.2.1 研究概况	(4)
1.2.2 评述	(5)
1.2.3 研究过程及方法	(6)

第二章 与锋面活动相关的长江口水文环境

2.1 潮波运动	(11)
2.1.1 潮波	(11)
2.1.2 潮汐	(13)
2.1.3 潮流	(14)
2.2 盐度	(16)
2.2.1 平面分布	(16)
2.2.2 断面分布	(18)
2.2.3 垂向分布	(19)
2.2.4 时间变化	(20)
2.2.5 盐淡水混合	(21)
2.3 悬沙分布和输移	(22)
2.3.1 悬沙分布	(22)
2.3.2 悬沙粒径	(23)
2.3.3 悬沙输移	(25)
2.4 河口最大浑浊带	(26)
2.4.1 最大浑浊带的变化规律	(26)
2.4.2 最大浑浊带形成的动力条件	(27)

2.5 长江口外流系 (27)

第三章 长江口水系和锋的分类

3.1 长江口水系 (29)

3.1.1 划分依据 (29)

3.1.2 长江口水系划分 (31)

3.2 长江口锋的分类 (34)

3.2.1 长江口近口锋(悬沙锋) (34)

3.2.2 长江口羽状锋(盐度锋) (35)

3.2.3 海洋锋(温度锋) (36)

3.2.4 流速切变锋 (37)

3.2.5 岬角锋 (37)

3.2.6 高盐水入侵锋(基底锋) (39)

第四章 长江口锋的基本特征

4.1 长江口近口锋 (40)

4.1.1 主要水文特征 (41)

4.1.2 河口生物特征 (48)

4.1.3 河口化学特征 (51)

4.1.4 泥沙输移及沉积特征 (58)

4.2 长江口羽状锋 (62)

4.2.1 主要水文特征 (64)

4.2.2 河口生物特征 (68)

4.2.3 河口化学特征 (83)

4.2.4 羽状锋区的生物地球化学过滤效应 (90)

4.3 流速切变锋 (95)

4.3.1 滩、槽流速切变及其环流形式 (96)

4.3.2 切变锋引起的滩、槽水、沙交换 (99)

4.4 高盐水入侵锋 (101)

4.4.1 长江口高盐水入侵的标准 (102)

4.4.2 高盐水入侵的基本情况 (102)

4.4.3 高盐水的基本特征 (105)

4.4.4 高盐水的来源和入侵机理 (106)

4.4.5 高盐水入侵对河口过程的影响 (107)

第五章 长江口水下三角洲沉积环境

5.1 长江口水下三角洲沉积结构、构造特征 (110)

5.1.1 沉积结构的变化 (110)

5.1.2	沉积构造分类及其特征	(112)
5.1.3	长江口锋面运动与水下三角洲沉积作用	(113)
5.2	长江口水下三角洲沉积地球化学特征	(114)
5.2.1	研究方法	(114)
5.2.2	元素的含量	(115)
5.2.3	元素分布趋势	(116)
5.2.4	元素的相关性	(116)
5.2.5	元素与环境参数的关系	(119)
5.2.6	元素沉积地球化学分区	(120)
5.2.7	元素分布的主要控制因素	(121)
5.3	长江口水下三角洲底质中活有孔虫分布	(123)
5.3.1	研究方法	(123)
5.3.2	数量分布	(123)
5.3.3	分异度	(123)
5.3.4	影响有孔虫分布的环境因素	(126)
	结语	(128)
	附表	(130)
	参考文献	(132)

第一章 绪 论

1.1 河口锋研究的意义

1.1.1 海洋锋的研究概况及分类

锋是发生在海洋或大气中一种普遍的物理现象。通常是指两种或两种以上水(气)团之间的界面。河口锋的研究则是由海洋锋研究延伸而来的。根据锋的定义,海洋锋指的是两种或多种具有明显不同水体之间的狭窄过渡带。其间的水平梯度可用水温、盐度、密度、悬浮泥沙、流速、叶绿素 a 等特征参数来确定。也就是说锋带的位置可以由一个或几个上述特征参数的特异性(最大水平梯度或更高的微商)来确定。

对海洋锋的研究始于 19 世纪中期,1858 年,美国海洋科学家 M·F·莫里曾把锋描述为一种“奇异的海洋现象”。1938 年,日本海洋学家宇田道隆曾描述了日本近海的海洋锋^[1],并进行了动力学研究。他除了根据动力和地形条件对锋进行分类外,同时还根据渔民的捕鱼作业经验,提供了不少描述性材料,例如“在水团与水团的分界上,常可发现具有独特的波纹或波浪的界面,它可以是一个辐合带,日本把它叫做激流,漂流物沿着辐合线聚集。这些漂流物中有废物,泡沫,木料碎片,以及浮游植物,软体动物,鱼及人的尸体等,因此激流区就是富饶的渔场”。类似的现象中国沿海渔民也早有所见,他们把锋线称“隔水”,在那里不仅可捕到被激流冲昏的鱼类,同时他们也据此在锋面的外侧撒网捕鱼。1959 年宇田道隆对锋的概况及物理学特征进行了较系统总结,并联系到日本沿海锋面与生物现象的关系,还预言,海底辐合带应是沙洲和沙丘形成的动力。从此以后海洋锋面引起人们的广泛注意,海洋锋面成为海洋学研究的一个分支。

海洋锋规模大小差异很大,小至以米为单位,大至全球范围的空间尺度,存在于海洋的表、中、底层。参照 Bowman^[2]的观点海洋锋通常可分为 6 类:

(1) 行星尺度锋。通常与表层厄克曼输运的辐合区有关,它们与全球的气候带和大气环流有密切的关系。如大西洋的亚热带辐合锋、南极锋,太平洋的赤道无风带的盐度锋、亚热带锋及北极锋等。

(2) 强西边界流的边缘锋。由于科氏力的作用,使得大洋环流西边界产生强化现象,出现了湾流、黑潮,随之热带高温、高盐水体向高纬度入侵,形成一个斜压性很强的锋面,随着湾流、黑潮流轴的弯曲及季节性变化,锋面的位置及强度亦随之摆动。

(3) 陆架坡折锋。位于大陆架沿岸水与高密度的陆坡水之间过渡带产生的锋面。这类锋的锋线延伸方向与陆架边缘平行,如中大西洋湾内发现此种锋。

(4) 上升流锋。通常在沿岸上升流期间形成,属于倾斜密度跃层的锋,也可以说是与沿岸风应力有关的表层厄克曼离岸输送的结果,秘鲁、西南非的西海岸有这种锋面现象,中国的舟山外海水域夏季期间也存在此种现象。

上述几种锋空间尺度大,持续时间较长,一般均以季节为单位;下面还有二种时间尺度和空间范围较小的锋面:

(5) 浅海锋。出现于内陆海、岛屿周围,海岸、浅滩等处,其主要形成的原因在于位于风、潮混合的近岸浅水水域与层化较深的海水交界处,如爱尔兰海,英吉利海峡,中国渤海、黄海等。

(6) 河口锋。通常指存在于河口水域两种不同性质水体(或水团)之间的界面,界面附近存在着一种或多种水文、化学、生物等要素的最大的水平梯度。基于河流水与海水混合是一个基本的河口物理过程,一般来说河口锋主要指的是不同盐度水体的界面。

1.1.2 河口锋的分类

河口锋是内涵意义十分广泛的概念,按不同的角度及不同的特征参数可分成不同的锋。如以锋面空间范围、时间尺度及主要制约驱动因素为标准则可分为羽状锋、潮汐混合锋、切变锋、岬角锋等;如以特征参数分类,河口区有盐度锋、温度锋、密度锋、营养盐锋、生物锋等。河口锋不仅存在于水体表面,而且也存在于底层及水体中间,前者如盐水楔,后者如跃层等。上述锋面其实并不是完全孤立的,它们之间有些是相互联系的。这里我们就以时空尺度、主要形成的机制来阐明河口锋的几种类型。

河流羽状锋

羽状锋是存在于河口地区一种重要的锋,通常把河流向外海扩散的冲淡水叫羽状流水,外海水与羽状流水之间的界面称为羽状锋,它形成的动力机制是由较轻水在海面上堆积倾斜而产生的压强梯度和下伏环境水的反方向产生的水平压强梯度共同引起的。羽状锋能在多数入海河口出现,在世界上各大河河口更加明显。如在亚马孙河、密西西比河、长江、珠江、哥伦比亚河、哈德逊河等的河口区均已观测到。羽状锋的时空尺度主要取决于河口入海径流量的大小及口外流系的变化。Cibbs(1970)^[3]在研究亚马孙河时指出洪季时垂直均匀的淡水可延伸至河口口门外 100~200 千米,存在着 100~200 千米宽的在陆架上延伸百千米范围的羽状流区。Park 等^[4](1978)指出在夏季期间哥伦比亚河羽状流覆盖海面范围达 10^5 平方千米。中国的长江洪季期间羽状锋可到达口门外 $123^{\circ}00'E$ 一带。羽状锋持续的时间一般以季度或月为单位,洪季最为明显,枯季缩至近河口口门区,甚至不明显。羽状锋位置也受到潮流的影响,在上述长周期变化基础上呈脉冲变化。

潮汐混合锋

潮汐混合锋主要出现在部分混合河口,此间由于海水一定存在分层现象,并受到潮流的明显作用破坏了层化现象,随涨、落潮流在河口口门一带产生辐聚,锋区运移距离可达到一个潮程以上。

在适用于部分混合河口的稳定状态的潮汐混合能量模式中,Bowman 及 Esaias(1981)^[5]认为在把充分混合水体与部分混合水体相隔离的河口锋带中,能量平衡可以表示为:

$$h/u^3 = bL\varepsilon k\rho/\beta g S_b Q_f \quad (1)$$

这里 h 为当地水深, u 为平均大潮的表层潮流振幅, b 是河口宽度, L 为穿过锋面的宽度尺度, ϵ 为混合效率, k 是与潮流有关的二次无量纲拖曳系数, ρ 是水体密度, β 为密度和盐度的比例系数, g 是重力加速度, S_b 为底层盐度, Q_f 为注入河口的淡水流量。

该方程所包含的意思是,在河口锋带地区,用于垂直混合的潮生紊动动能的产生率与重力环流中浮力(浮力通常使水体分层)的水平通量之间存在着平衡关系。

如果对于一给定的地点和河流径流,上述方程的右边可以看作常数,那么河口潮汐混合锋的位置应该跟随 h/u^3 等值线。当然河口宽度 b 随其长度而变,底部盐度会向河口上游减小,潮汐混合效率也不会是常数,然而这些变化都是逐渐的,因为 h/u^3 在河口内会变化几个数量级。

流速切变锋

主要指发生在河口口门内由滩、槽流速切变而产生的锋,也有称为动力辐聚锋(Leussen)^[6],它主要的特点是锋平行于河口轴,在那里潮汐潮流产生的底部湍流足以破坏垂直层化现象。切变锋的周期是在潮过程进行的,涨、落潮流转流和岸滩及深槽流向、流速变化差异较大的时刻,易形成此锋。锋的长度可达几千米到几十千米,锋的界面向河口或水道中心倾斜,因锋的变化伴随着盐度的水平差异,Klemas 及 Davis(1977)^[7]对美国特拉华湾的研究中指出,1米宽的水平距离上由于盐度的跃变,使密度差达到 4,锋面处约有 10~20cm/s 的辐合速度。有关学者曾报导过,在特拉华湾锋面处,水体中重金属元素如铬、铜、铝等的含量可比本底值高三个量级。

岬角锋

在河口区域的岬角、浅滩和岛屿周围,由地形及潮流辐聚而产生的一种锋。岬角锋是一种小尺度的锋,一个潮周期内完成锋生和锋消的全过程,其长度尺度不超过一个潮程。岬角锋具有表面锋的共同特征(如表面辐合,锋射流,泡沫线,水色变化等)。由于流线辐合时,海面高度会下降,流线弯曲时,法向加速度被海面倾斜所平衡,因此,岬角锋附近海平面会产生降低现象。

如果以特征参数来划分河口锋的类型将是另外一种特色,这里不再叙述。

1.1.3 河口锋研究历史及现状

河口锋的研究始于 20 世纪 70 年代初,Gibbs(1970)^[3]研究亚马孙河环流结构时提出河口羽状流的扩散范围。Wright(1971)^[8]在研究密西西比河口盐水楔时提到锋的概念。Garvine 及 Monk(1974)^[9]明确指出河流羽状流的流动受到潮汐的影响并对河口混合起着重要作用,指出羽状流区有一个明显的锋面结构,从海水颜色及泡沫带的辐聚均能看到锋的存在。他们的研究,标志着河口锋及羽状锋的研究进入实质性的阶段,此后河口锋研究受到河口学家广泛重视。1977 年 5 月由海岸海洋学家在美国纽约 Stony Brook 海洋中心进行为期三天海洋锋的专题讨论会,着重评价海洋锋(包括河口锋)研究现状及今后的研究方向,并由 Bowman 及 Esaias 主编了《沿岸过程中的海洋锋》一书。自此以后有关河口锋面的研究进一步深入展开。McClimans(1978)^[10]详细描述了注入挪威峡湾河流的多种锋面类型,近岸区切变锋、远岸河流锋面即羽状锋等。1986 年在荷兰召开国际河口物理过程专题讨论会,会后由 Leussen 及 Dronkers 主编的《河口物理过程》引言中,就河口锋和河流羽状锋作了概括性介绍,指出河口锋是河口物理过程一部分,并提出在一个潮周期内潮汐运动和地形之间在形成“内河口锋”方面起着重要作用,河口横向环流可以生成对称聚合锋。另一类重要的锋则是羽状锋,锋对河口混和过程和水体环流起着重要的作用。McClimans 对河口锋的锋生、锋消原理、分类做了总结,还应用有关河口

学者研究成果介绍了河流羽状锋(莱茵河口和 Askashi 河)、河口锋(詹姆斯河)、对称聚合锋(Con way 河口)。此外通过建立数学模型基础上对锋的物理过程进行理论性探讨。Leussen 等认为到这一时期为止有关河口锋和羽状锋的理论阐述仍还是十分困难的。

20 世纪 80 年代末至 90 年代,河口锋的研究仍然是一个河口研究的热点,除了现场观测及分析动力机制等多有报导外,更多地把河口锋的变化与河口生物过程、化学过程和沉积过程联系在一起。Curtin(1986)^[11]指出河口锋面之间可能存在多级环流结构。Largier(1993)^[12]指出河口锋在河口物质输移、营养盐分布及生物活动、污染物的聚合与扩散中起着重要作用。Morris^[13]根据英国 Hamber 河羽状锋研究后指出,不同季节从河流输入河口及从海洋输入河口的营养盐存在着汇与源的变化。Mackas(1997)等也在加拿大有关河口做过类似的研究。

1.1.4 河口锋研究的重要意义

河口锋面现象是河口水域一种重要的自然现象,由于锋面区域垂直环流,动量和其他特征参数(生物、化学、悬沙等)交换非常强烈,而且锋面经常随着时间变化它的位置。它扮演的角色如此重要,以致它参与并影响河口的物理、化学、生物及沉积等各个过程,也即影响了河口的环流结构,同时对河口营养盐、悬沙等的输运起着重要作用,从而也对河口生物分布变化起着明显的制约作用。此外,它对河口入海通量的变化,海陆相互作用界线的划分,乃至河口水下三角洲区域的确定等均具有重要的意义。

河口锋与渔业生产有着密切的关系。由于锋面附近是一个辐聚带,大量的浮游生物在此聚合,那里是海洋高生产力区,渔场往往就是分布在锋区移动范围一带,如长江口外的渔场就与长江口羽状锋区有密切关系。根据长期在长江口引水船工作的人员反映,20 世纪 60~70 年代,每当锋面过境时,经常可看到被激流打昏了的黄鱼等鱼类聚集在河口泡沫带(即长江近口锋带)附近,随时都能捞到。

河口锋面与河口环境有着明显的关系,它主要表现在三个方面:首先,单侧或双侧的海面辐合能有效地聚集漂浮在海面的碎屑及其他颗粒物质,辐合带中重金属的浓度比沿岸水域本底浓度大 2~3 个量级,油膜常排列在海面辐合带,在长江口北港水域能明显地看到油污的辐合带,上述的这些现象也为清除污染物创造有利的条件和可能。其次,了解锋面位置及其变化对排污口或取水口选择及石油平台的选位均具有重要的意义。例如杭州湾北岸星火工业区岸段,由于受到长江冲淡水扩散的影响及切变锋的作用,使得沿岸水域产生锋带,锋带之内,水质污染比较严重,并且因海水随潮流往复运动,不易扩散至外部水域;而在锋面之外水质比较干净,且能充分利用强潮流作用产生海水的自净能力。据此,有关部门经过科学分析将排污口选择在锋面外侧,达到既节约了投资费用又能保护环境的良好作用。此外,由于锋面的阻隔作用,在河口外缘选择合适的海洋冲废趋势也是至关重要的。

1.2 长江口锋面研究

1.2.1 研究概况^[14]

长江是中国第一大河,多年平均流量为 29 000 立方米/秒,年径流总量为 9 240 亿立方米。

巨量的长江径流出口门后以冲淡水状态向外扩散,与由南向北的台湾暖流及位于海区东北的黄海冷水团交汇,形成了明显的河口锋面。长江口锋面研究实质上是围绕着人们对长江冲淡水扩散认识的不断深入而逐步展开的。早在 20 世纪 60 年代初期,毛汉礼等(1963)^[15]在长江冲淡水及其混合问题的初步探讨一文中曾指出:长江冲淡水在东海的扩散分布存在着两个边界,即冲淡水的主体边界和整体边界。如果以海水盐度值 4‰~32‰确定长江冲淡水,表层盐度值 26‰即为主体边界,即冲淡水的核心部分,实际上就是现在我们所说的羽状锋位置,当然正式命名长江口羽状锋那是后来的事;整体边界即冲淡水向东扩散的外缘,以盐度值 32‰为准,洪季期间向东北扩散最远可至济州岛附近的水域。毛汉礼等对长江冲淡水的研究可认为是有关长江河口锋面初期的同时又是很重要的基础研究。1979~1982 年期间,中美两国科学家进行了长江口动力沉积合作调查研究,在此基础上,Beardsley et al(1985)^[16]描述了东海陆架上长江冲淡水的时空结构,认为在夏季洪水期,长江冲淡水可能出现分支扩散,靠近长江口冲淡水呈双舌型结构,冲淡水的大部分呈羽状流状态,在相对浅的水层中流向东和东北,其余部分沿岸向南流动。并指出表层盐度 18‰~26‰等盐线在长江口外呈东北方向,它就是羽状锋的位置,这是首次在长江口提出羽状锋的概念。翁学传、王从敏(1984)^[17]在《东海西北部海水温、盐度结构初步探讨》一文中,以历史资料及中国科学院海洋研究所锋面调查资料为基础,以盐度为主,温度为辅的区分原则,认为长江口外存在着东侧锋面及西侧锋面。西侧锋面位置比较稳定,全年大致在 122°10'E~122°40'E 之间,受潮汐影响呈半日周期摆动,锋面以西为长江冲淡水,以东为混合水;东侧锋面以西为混合水,以东为台湾暖流水,但表层主要受长江径流影响,深层则台湾暖流起主导作用,表层锋线大致沿 123°00'E 分布,深层锋线在 122°30'E~123°00'E 之间,锋面位置具有明显的季节性变化。

苏纪兰等(1986)^[18]提出长江口存在着两个锋面,一是羽状锋,它主要受控于长江北港及北槽冲淡水的影响,另外存在着次一级锋面,它主要受控于南槽流出来冲淡水的影响,并可延伸至杭州湾北部。恽才兴等(1986)利用卫星照片分析,根据不同含沙量即反映的灰度差异将长江口水体分为浑水舌、浊水、沉积羽流、冲淡水四个级别。王康璿等(1990)^[19]根据中法联合长江口生物地球化学调查资料,认为表层盐度值 25‰为羽状锋面所在的位置。

在研究表层锋面的同时,有关学者也对与海底锋面有关的上升流现象进行探索,赵金山等(1986)^[20]指出由于台湾暖流的作用在长江口有上升流存在。赵保仁(1991)^[21]也提出类似的想法。此外赵保仁根据 CTD 剖面资料(1986)分析长江口冲淡水垂向锋面(盐跃层)的变化,指出长江口该时期跃层最强区分布在长江口外 122°30'E 一带,与此间 5 米层中的高盐区相一致,即与长江口外的上升流区相吻合,跃层厚度的变薄是上升流抬升形成的。潘玉球等^[22]根据大量观测资料指出:夏季,在长江口冲淡水转向区段内,外海下层海水入侵在此涌升,位置约在 31°50'N,122°50'E 附近。

1.2.2 评述

通过上述长江口锋面研究概况的回顾,不难看出以往对长江河口锋面现象的初步分析基本上是围绕着长江冲淡水的扩散研究而展开的,在不同时期逐步取得一些新的认识:如在长江河口纵向上存在着二级锋面,即主锋面和次锋面,在长江口存在着上升流现象等。然而毕竟长江河口锋研究还是一项新的研究课题,加之观测范围、观测手段等的限制,20 世纪 80 年代末