

长江河口盐度锋*

胡方西 胡辉 谷国传

(华东师范大学河口海岸研究所, 上海 200062)

苏诚 顾学俊

(国家海洋局东海分局, 上海 200137)

提要 根据1988—1991年河口锋面现场调查、上海市海岸带调查及历次标准断面调查资料对长江盐度场及盐度锋进行了分析,提出了由口门至外海纵向上存在着三级锋面现象:内侧锋面即长江河口锋为长江河口水与长江冲淡水的界面;羽状锋是长江口羽状流水与口外混合水的界面,它是长江口最主要的盐度锋面,也是长江口一个重要的生物地球化学带,对河口沉积过程及水下三角洲发育具有重要的影响。外侧锋面即海洋锋,是长江冲淡水的最外边缘。

关键词 盐度 河口锋 羽状锋

河口锋面作为产生于河口水域的重要物理现象,近年来,愈来愈受到河口学家的广泛重视,它与河口环流、水质、海洋生产力及河口沉积过程有着十分密切联系。自70年代开始对长江口锋面现象的研究逐步展开,但基本上局限于水文分析。本文在大量现场观测资料基础上,对长江口发育最为典型的盐度锋的形成机理,锋区的水文、化学和生物基本特征进行了研究探讨,并提出了长江口羽状锋的存在和运移对水下三角洲发育有着密切关系,以及存在于该水域的生物地球化学过程的基本特征。

1 长江口外盐度场

1.1 水平盐度场 长江冲淡水、台湾暖流水及南黄海混合水是控制长江口外盐度场变化的三个最主要因子。长江径流有洪、枯季之分,外海水系随时间在变化,因而不同年份、不同季节、不同潮时的盐度水平分布有很大差异,为了把这一动态现象作静态状况来分析,本文采用将长江口外水域划分为众多小区(500m × 500m),对同一小区内不同时期的盐度值分别进行平均(资料期限1975—1991年),据此绘制成平面分布图(图1)。

由图1a可以看出:夏季表层等盐线分布总趋势由口门先向东南,至122°20′—122°30′E折向东北,呈舌状伸展。以盐度值30为准,在32°30′N以北,等盐线略呈纬向分布;32°30′N以南,则呈东北-西南走向。冬季表层等盐线分布与夏季有很大差别(图1b),同一量值的等盐线普遍内移,以盐度值30为准,在31°00′N水域,它比夏季内移约75n mile,25等盐线西移约40n mile。同时,表层冲淡水舌主轴偏向东南。多年平均统计

* 国家自然科学基金重大项目资助项目, 9487005。胡方西,男,出生于1939年1月,教授。

收稿日期: 1994年1月23日,接受日期: 1994年4月12日。

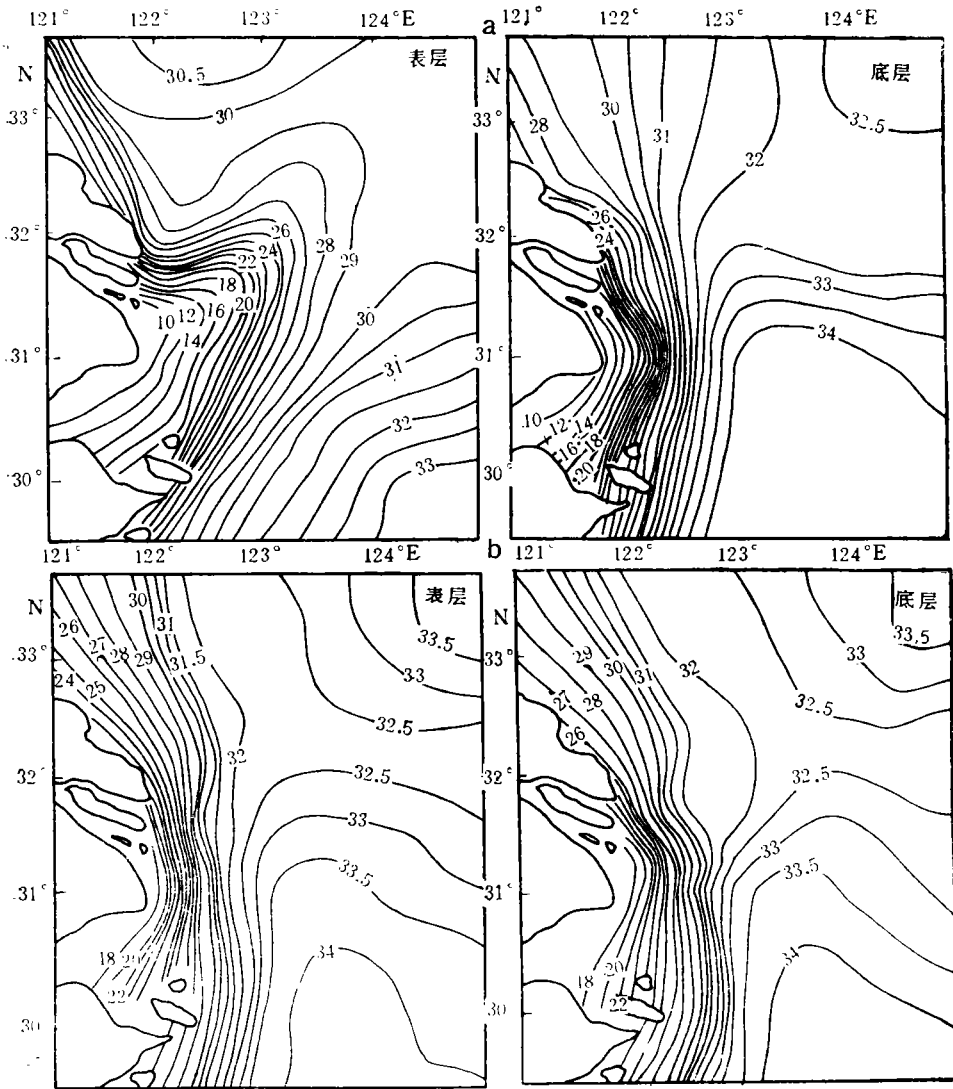


图 1 长江口盐度平面分布

Fig. 1 Salinity distribution in the Changjiang estuary

a. 夏季(8月); b. 冬季(2月)。

表明: 全年长江冲淡水主轴(表层) 8 月份为东北向, 11 月为正东, 2 月偏东南, 5 月又向正东。即从夏至冬, 由东北按顺时针方向偏转, 每月变化角度约 $10-15^\circ$ 左右。

底层盐度分布与表层差异较大, 无论是冬季或夏季, 底层冲淡水舌均指向东南。在 $123^\circ 00'E$ 、 $31^\circ 30'N$ 以东水域都能受到台湾暖流影响, 只是夏季向西伸入更远; 而海区北部等盐线大致沿东南-西北走向。此外, 对不同季节、不同水深层次的淡水舌统计分析可发现: 随着水深增加, 夏季冲淡水舌呈右偏, 尤其是 8 月份这种偏离最明显, 即由表层的东北向逐渐右移, 10m 以下已趋向东南偏东, 至底层已为东南方向(图 2); 冬季则相反, 表层比底层更偏向东南。这种冲淡水舌的季节性右偏现象及由表至底不同层次的偏移特

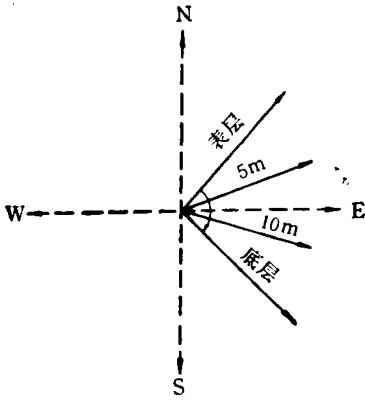


图2 8月份不同水深层次冲淡水主轴方向
Fig. 2 Main axis direction of the diluted water in the different depths in August

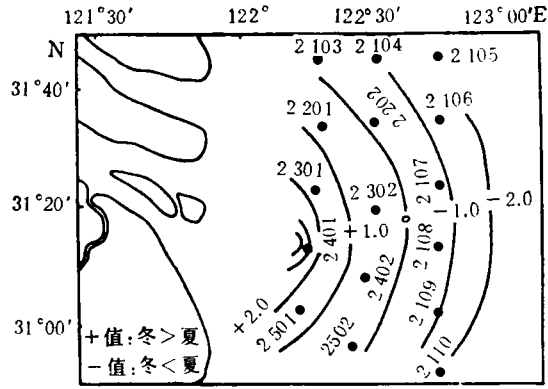


图3 长江口冬、夏季底层盐度差变化图(1982)
Fig. 3 Differential salinity of the lower layer between summer and winter in the Changjiang River Estuary (1982)

点,对长江口悬浮物质输移乃至以下三角的发育有着重要作用。

1.2 垂直盐度场 长江口盐度垂向分布随时间、地点不同有着明显差别。就季节变化来看,夏季表底层差异最大,春、秋季次之,冬季垂向上趋于相对均匀。夏季长江巨量径流入海,由于此时海面水温高于底层,海水稳定度大,垂直混合作用较弱,使长江冲淡水漂浮在较重的外海水之上,并扩散到很大的水域空间;夏季台湾暖流向北延伸较远,高盐海水从底部楔进或影响长江口水域,造成长江口水域表底层盐度差特别显著。表1是根据1982年8月和12月长江口同步观测得到的日平均盐度值(上海市海岸带和海涂资料调

表1 长江口区域日平均盐度统计表(1982年8月、12月)

Tab. 1 Daily averaged salinity in the Changjiang River Estuary (August and December of 1982)

水域		东 断 面						中 断 面				西 断 面			
站 号		2105	2106	2107	2108	2109	2110	2202	2302	2402	2502	2201	2301	2401	2501
测站水深(m)		33	32	40	38	21	26	20	18	16	15	12	9	12	10
8月	表层	21.47	16.88	16.14	11.01	13.17	16.57					14.96	10.44	9.10	8.76
	底层	33.39	33.60	34.09	33.69	32.25	32.40					28.96	21.63	14.30	12.68
	差	11.92	16.72	17.95	22.68	22.08	15.83					14.00	11.19	5.20	3.92
	n	0.28	0.56	0.61	0.78	0.68	0.58	0.50	0.70	0.76	0.59	0.63	0.66	0.36	0.35
12月	表层	31.80	31.89	32.18	31.52	26.29	24.56					25.20	15.07	15.27	11.48
	底层	31.77	31.89	32.19	31.97	29.51	30.01					30.24	21.77	20.30	14.35
	差	0.03	0.00	0.01	0.47	3.22	5.45					5.04	6.70	5.03	3.03
	n	-0.001	0.000	0.001	0.009	0.100	0.200					0.18	0.35	0.27	0.23
冬夏表层差		10.33	15.01	16.04	20.51	13.12	7.99					10.94	4.63	6.17	2.72
冬夏底层差		-1.62	-1.71	-1.90	-1.72	-2.74	-2.39					1.28	0.14	6.00	1.67

注: n 为分层系数, $n = \frac{\text{底层盐度} - \text{表层盐度}}{\text{平均盐度}}$; 资料根据上海市海岸带海洋水文调查。

查报告, 1988)(站位见图 3)。由表 1 可知东断面表底层盐度差最大, 尤其是 2108 站, 其差值达 22.68, 平均垂直梯度达 0.59/m, 最大跃层强度位于 10m 处左右, 达 4.0/m; 中断面盐度差次之, 西部断面较小。整个夏季海水明显分层, 东、中断面一带更为显著, 最大分层系数值可达到 0.78。

长江口盐度垂直分布与水深变化密切相关: 夏季, 水深小于 5m 的浅水区, 潮混合较强, 水体相对均匀; 水深 5—12m 之间的水域, 表底层盐度差明显, 但大致呈线性增加; 水深大于 15m 的水域, 上层盐度随水深增加很快, 下层盐度变化不大, 其转折处在水深 10m 左右, 此间存在着强烈的垂向盐度梯度。径流强弱对盐度垂向结构有明显影响, 径流量大, 跃层强度增大, 并更接近上层。如 1991 年 8 月长江出现特大洪水, 从长江北港口外断面实测资料可知, 近口门附近垂向盐度分布相对均匀, 在 122°15'—30'N 之间水体明显分层, 其间水平距离约 28n mile, 水平盐度平均梯度仅 0.065/n mile, 而垂向上从表层至 5m 层存在强烈的跃层, 平均强度可达 4.0/m, 最强处位于水深 3—4m, 达到 8.0/m。123°00'E 以东水域, 随着离河口距离增大, 跃层减弱并下移, 再往外又上移。

冬季, 由于表层水温低于底层水温, 垂直混合明显加强, 表底层盐度差变小。由表 1 我们还可发现一个重要现象: 东断面冬、夏表层盐度差值很大, 同一测站冬季盐度普遍高于夏季, 如 2108 站其差值可达 20.51; 而底层则相反, 同一测站夏季盐度高于冬季。西断面, 表底层盐度都是冬季比夏季高。由此可发现: 长江口外 122°30'—40'E 之间的水域是一个重要界面(图 3), 该水域以西, 全年表底层盐度变化主要受制于径流; 水域以东, 除表层水体在晚春、夏季及初秋时期受到长江径流影响外, 其它时间中、下层水体主要受控于口外水系的影响。

2 长江河口盐度锋

对长江冲淡水及锋面的研究, 早在 60 年代初期, 毛汉礼等(1963)就提出了长江冲淡水主体边界及整体边界概念, 前者是指冲淡水的核心部分, 大致相当于 26 等盐线; 后者是指冲淡水最外边界, 大致相当于 32 等盐线。1979—1982 年中美联合长江口沉积动力学调查中(Beardsler et al., 1983)已提出, 夏季长江口外 18—26 的等盐线向东北方向分布, 形成羽状锋结构。翁学传等(1981)提出在长江口存在两个锋面, 东侧锋面为混合水和

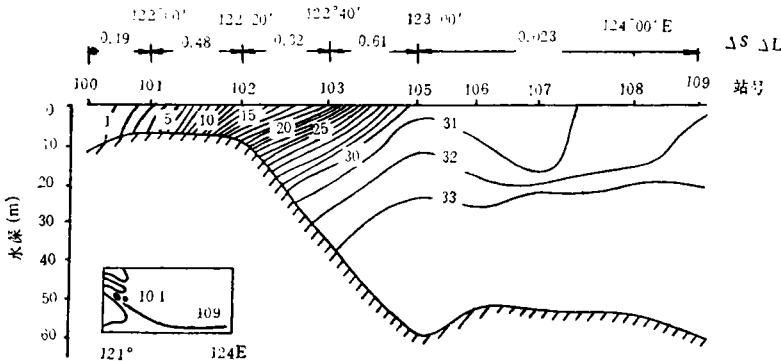


图 4 长江口纵向断面盐度分布 (1989.8)

Fig. 4 Longitudinal distribution of salinity in the Changjiang River Estuary (1989.8)

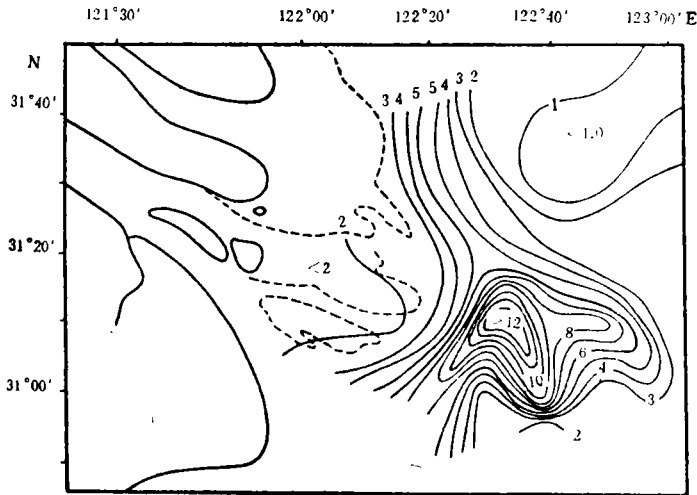
图 5 长江口表层叶绿素 a 分布图 (1988.8)Fig. 5 Chlorophyll a distribution of the surface layer in the Changjiang River Estuary (1988.8)

表 2 长江口水系分布特征

Tab. 2 Distribution characteristics of the water systems in the Changjiang River Estuary

水系类型	盐度	含沙量 (kg/m^3)	特征	与锋面关系	主要分布范围
长江径流水	<1	>0.1	淡水		长江口内各汉道
长江河口水	1—5	>0.1	低盐高沙 低盐中沙	在河槽内可见切变锋 其东端为河口锋界面	北港、南北槽下端及口门附近
长江冲淡水	羽状流水	5—25	0.1—0.5 中盐中沙 中盐低沙	西端为河口锋、 东部为羽状锋范围	西界 122°00'—122°10'E 东界 122°40'—123°00'E
	口外混合水	25—31	<0.1	中盐低沙	西端为羽状锋
外海水	>31	极低	高盐	同冲淡水交界处 存在海洋锋	分布在长江冲淡水以外及以下

台湾暖流水的界面,西侧锋面为长江冲淡水与混合水的界面。苏纪兰等(1989)提出长江口次级锋概念,另外,王康善等(1990)也曾提出以盐度 25 作为长江口羽状锋的界线。

在上述研究基础上,根据 1988—1991 年多次调查成果,笔者根据长江口的特点,用盐度、悬沙两个特征参数把长江口划分为四级水系(表 2),并据此提出存在于长江口的三个盐度梯度带(图 4),确立了长江口由河口口门至外海在水平方向上存在着三级盐度锋面,即河口锋面、羽状锋面、海洋锋面。

2.1 长江河口锋 它是长江河口水与羽状流水之间的界面。长江河口水带着巨大的惯性出口门后,随着水深逐步增加及水域范围的扩大形成了明显的盐度梯度,即河口第一级盐度锋,我们称之为长江河口锋。锋面连线呈弧状向外突,由于科氏力作用下锋面连线具有向东南方向偏转趋向。锋生、锋消具有明显的潮周期特点,据 1989—1991 年间在长江口

表 3 长江河口锋锋线两侧盐度、含沙量变化

Tab. 3 Salinity and sediment concentration variations of both sides of the front in the Changjiang River Estuary

水域	观测时间	水深 (m)	层次	盐 度		含沙量 (kg/m ³)	
				锋内	锋外	锋内	锋外
西 边 界	1990	10	表	8.23	9.85	0.2380	0.1202
	5.25		5m	9.72	10.06	0.3210	0.9740
	10:00		底	11.51	12.48	4.9610	4.4340
	1990	11	表	5.15	6.23	0.2118	0.0795
	9.27		5m	5.36	9.11	0.2348	0.1184
	10:30		底	6.40	14.91	1.0695	0.6180
	1990	11	表	5.98	7.14	0.0638	0.0785
	9.30		5m	6.98	7.22	0.7782	0.0775
	12:30		底				
东 边 界	1988		表	14.42	17.49	0.2372	0.1705
	8.29	15	5m	17.36	19.51	0.5223	0.2432
	09:10		底	23.61	23.99	1.2344	0.4311

注: 西边界测站位于 122°06'E, 31°04'N; 东边界测站位于 122°22.5'E, 31°08'N。

引水船 (122°06'E、31°04'N) 的定位观测, 锋面随涨落潮进退, 表层盐度一般在 5—14 之间, 最适于锋面存在的盐度大致为 7, 锋面两侧的表层盐度梯度差值较大, 但垂直分层现象不很明显 (表 3)。锋区附近盐度水平盐度梯度为 0.48/n mile, 垂直分层系数为 0.20—0.40 (图 4), 显然这与该水域水深较浅, 潮流强劲, 垂直混合相对较强有着密切关系。由于这一锋面是河口最大浑浊带外缘, 因而具有明显的悬沙锋特征, 锋面两侧水色、含沙量均有显著差别, 因此也称之为悬沙锋。锋线附近往往形成泡沫带, 并积聚着草根、瓜皮、塑料等废弃物。锋面移动随潮周期而变化, 如 1990 年 9 月 27 日及 30 日两次观测到的锋面均出现于低平前后, 间隔时间与潮时滞后现象一致。锋面随潮流移动范围可达 10—15km, 甚至更大, 锋面的外侧边缘最东可达到 122°30'E 左右。表 3 还列出 1988 年 8 月 29 日涨潮初期河口锋形成时运移在长江口外最东一侧时的实测记录, 锋面两侧的含沙量、盐度差别明显, 锋面内侧 5m 层含沙量高达 0.5kg/m³, 外侧仅 0.24kg/m³; 锋面内侧表层盐度 14.42, 外侧盐度 17.49, 比起锋面的西边界来说, 盐度明显增高。这表明锋面随潮进退时, 沿程盐度、悬沙在不断变化。对锋面跟踪观测还发现当潮流速大于 1m/s 时, 泡沫带及水色线随之消失, 这意味随着对流作用及涡动作用加强, 锋面不易形成。长江河口锋面现象有出现多发生于夏季和春秋季节, 冬季很少出现。因此, 造成夏季是长江口外悬沙主要沉积时期, 而冬季则是悬沙再悬浮向南输运时期。

2.2 长江口羽状锋 长江口羽状流水体与口外混合水体的界面, 它是长江口第二级也是最典型的锋面。由图 1 及图 4 可知, 夏季长江口表层水体存在一个向东北的淡水舌, 中心部位在 31°40'N, 122°40'—123°10'E 一带, 盐度 20—27 之间有一个明显的水平梯度带, 其中 22—26 梯度更甚, 我们把表层盐度 20—27 之间水域称羽状锋区; 盐度 25 作为锋面特征盐度参数, 因为它既是长江冲淡水核心部位, 又大体上反映了洪季长江冲淡水主轴部分脱离海底的位置。长江口羽状锋的形成主要是作用于上层的长江冲淡水向外扩散与

由底层向里入侵的外海高盐水在这一水域交汇的结果。长江河口水出口门后以冲淡水状态在惯性力、科氏力作用下偏向东南;在 $122^{\circ}20' - 122^{\circ}30'E$ 一带,由于口外海水受到长江口外水下谷吸引及台湾暖流沿西北方向入侵,推动浙江外海高盐水体向北扩展,对长江冲淡水起顶托作用,加之夏季盛行东南风,使冲淡水折向东北,其间又受到南黄海混合水由北往南扩散影响,造成以浮托力为主的长江冲淡水呈弧状向东北方向延伸。水平盐度梯度最大处,即形成羽状锋锋面。图 4 表明,此间大致表层盐度 25,底层为 31,由此向外,冲淡水脱离海底,厚度逐渐变薄,因而羽状锋一带可认为是长江冲淡水核心部位或转折带。

长江口羽状锋有着明显时空变化,就平均状况而言,夏季锋区范围最广且偏向东北,以盐度 25 为准,离口门最远距离约为达一个半径距;春季(5 月)基本上沿正东方向呈弧状向口外沿伸,离口门约 0.7 径距;秋季(11 月)大致与春季相似,锋面最外缘位于 $122^{\circ}35'E$ 一带;冬季仅在河口东南方向 $122^{\circ}20'E$ 一带出现不很典型的锋面。

长江口羽状锋除存在着强烈的水平盐度梯度外,垂向上也有较明显分层现象,盐度分层系数可达 0.40—0.50 之间。锋面是一个辐聚带,长江径流携带的丰富营养盐在羽状锋区聚集,由于水域含沙量低、透明度大,光合作用进行充分,有利于海洋生物繁殖生长,同时盐度适中,既可满足外海高盐种、又适应沿岸低盐种的发展,使羽状锋区成为一个海洋高生产力带。如长江口外叶绿素 *a* 的高含量区,与羽状锋锋面大致吻合(图 5)。羽状锋区,海水分层明显,生物作用活跃,海水化学要素也产生相应变化,以溶解氧和 pH 为例,形成了表层海水中高溶解氧及高 pH 值,据 1988 年 8 月调查,长江口外 $122^{\circ}30' - 122^{\circ}50'E$ 附近上层海水溶解氧含量达 6.0ml/L 以上,平均饱和度超过 100%,pH 值最高达 8.3。而底层则相反,是溶解氧、pH 低值区,溶解氧含量低于 2ml/L,饱和度不足 30%,这显然与大量海洋生物尸体有机质在沉积过程中不断氧化分解有关,而夏季盐度的分层、海水强烈的稳定度限制了上下层垂直对流。从一定意义上来说羽状锋区是长江口的一个重要的生物地球化学带,在该区上层海洋生物活动频繁,吸收了大量营养盐和吸附一些化学元素,并随着生物尸体沉降到海底,尸体的分解释放出一些营养盐,消耗了溶解氧,降低了 pH 值,构成了河口第二个过滤效应 (Tian Rucheng, 1991)。

由于这一水域存在着一个显著生物地球化学沉积过程,以及锋面的屏障作用阻止了悬沙向外输移,因而羽状锋区的外缘和长江水下三角洲的外边界大体相当,据此,我们认为长江河口的外边界实际可以由羽状锋的外缘来确定。

2.3 海洋锋 或称陆架锋,长江冲淡水的最外边界。以表层盐度 31 为准,就平均状况而言,夏季在 $125^{\circ}00'E$ 之外,5 月份在 $124^{\circ}00'E$ 左右,11 月份在 $123^{\circ}30'$ 一带,2 月份则退到 $123^{\circ}00'E$ 附近水域,该锋面实际上是长江冲淡水与外海水的界面,具有海洋锋性质(胡方西,1993),比起长江口门的上述两个锋,盐度的水平梯度和垂直层化现象相应小得多,而锋面处水温变化相对较激烈。由于这一水域已超出河口范围,本文不再进行深入叙述。

3 结论

3.1 按照悬沙含量及盐度二个参数,长江口水系可划分为径流水、河口水、冲淡水及外海水,长江冲淡水又可进一步划分为羽状流水及口外混合水。

3.2 长江口不同水系交界处存在着三级盐度锋面,即长江河口锋、羽状锋和海洋锋。长

江河口锋是长江河口水与长江羽状流水界面,锋区表层盐度大 5—17 之间,特点是盐度水平梯度大,并有显著的悬沙锋面特征,与潮汐混合有密切关系。羽状锋面位于长江口外水深 20—40m 一带水域,锋区表层盐度 20—27,具有水平盐度梯度大,盐度垂直分层明显,在长江口外呈弧状向外突出,可达 $123^{\circ}00'E$ 水域。海洋锋面是长江冲淡水最外边缘,春夏季向东可达到 $124^{\circ}00'E$ 以东水域。

3.3 长江口羽状锋是长江河口最主要的盐度锋面,它对生物、化学、水文等要素均产生重要的影响和作用,羽状锋区是生物地球化学带,对河口沉积过程及水下三角洲的发育起着重大影响,因而可以认为羽状锋外缘是河口的外边界。

参 考 文 献

- 上海市海岸带和海涂资料调查报告,1988,上海科学技术出版社,15—40。
毛汉礼等,1963,长江冲淡水及其混合问题的初步探讨,海洋与湖沼,5(3): 183—206。
翁学传、王从敏,1981,东海西北部海水温、盐度结构的初步探讨,海洋科学集刊, 21: 52—59。
Hu Fangxi, Hu Hui and Gu Cuochuan, 1993, Basic characteristics of plume fronts in the Changjiang River Estuary: proceedings of the symposium on the physical and chemical oceanography of the china seas, China Ocean Press (Beijing), 244—257。
Su Jilan, Wang Kangshan, 1989, Changjiang River plume and suspended sediment transport in Hangzhou Bay, *Continental Shelf Research*, 9(1): 93—111。
Tian Rucheng, Chen Jiyu, Zhou Juzhen, 1991, Dual Filtration Effect of Geochical and Biogeo-chemical Processes in the Changjiang Estuary, *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 9(1): 33—43。
Wang Kangshan, Ru Rongzhong, Dong Lixian 1990, The Water Masses in the Changjiang River Estuary and the Adjacent water Area and Their Effects in the Distribution of Biological and Chemical Elements, China Ocean Press (Beijing), 19—35。

SALINITY FRONTS IN THE CHANGJIANG RIVER ESTUARY

Hu Fangxi, Hu Hui, Gu Guochuan

(*Institute of Estuarine & Coastal Res., East China Normal University, Shanghai 200062*)

Su Chen, Gu Xuejun

(*East China Sea Branch, SOA, Shanghai 200137*)

ABSTRACT

This paper reports results of analysis of data records and of multi-subject investigations on the salinity fronts and salinity field in the Changjiang River Estuary summarized as follows:

(1) Based on the characteristics of the water zone in the Changjiang River and the suspended sediment concentration and salinity, the waters here can be divided into Changjiang runoff, estuarine water, diluted water (further divided into plume water and mixing water outside the estuary) and oceanic water.

(2) The Changjiang Estuary has three salinity fronts. From the river mouth to the sea: estuarine front, plume front and ocean front. The estuarine front is the boundary between the estuarine water and plume water, is located outside the estuary, near the water depth of 10m has surface salinity of 5 to 17, and is characterized by large horizontal gradient and the obvious suspended sediments. The plume front is the boundary of the plume water with the mixing water out of the estuary, has surface salinity of 20 to 27, and is characterized by a large horizontal gradient and an obvious vertical stratification. The front is the outer margin of the Changjiang diluted water and has surface salinity of 30 and 31.

(3) The plume front, the most important salinity front in the Changjiang estuary, greatly affects the biology, chemistry, hydrology and sedimentation, and is an estuarine bio-geochemistry zone. Moreover, it also plays an important role in the development of the submerged Changjiang delta and its sedimentation. So it is taken as the outer margin of the Changjiang Estuary.

Key words Salinity Estuarine front Plume front