

长江河口盐水入侵锋研究*

茅志昌

(华东师范大学河口海岸研究所, 上海 200062)

提 要 根据1959—1988年部分年份长江口南港-南槽、南港-北槽、北港和北支共22个纵向测次资料, 计算分析各入海通道内盐水入侵锋的伸退区域及其特征。利用密度佛氏数 F'_s 的计算结果, 提出确定盐度锋迁移范围和滞流点的判据。研究表明, 盐度锋对河口最大浑浊带主要有两大贡献: 锋区含盐度有利于泥沙絮凝; 锋面附近形成的重力环流, 有利于泥沙富集, 形成最大浑浊带。

关键词 盐度锋 滞流点 盐淡水交混 重力环流 密度佛氏数

自70年代以来, 海洋锋作为一门新兴的学科受到愈来愈多的国内外学者的极大兴趣和广泛研究, 并取得了一系列重要成果(翁学传等, 1984; 王康塘等, 1992)。但研究区域多集中在大陆架浅海范围, 对两侧受固体约束的河口区, 因受径潮流交混作用产生的盐水入侵锋的研究, 目前报道甚少。

长江河口三级分汊4条水道入海, 具有典型的冲积三角洲河口的特性。50年代后期开始, 许多学者对其沉积地貌、水文泥沙进行了观测研究。近年来, 尤其对河口环流、盐淡水混合、泥沙絮凝、冲淡水等方面进行了深入探讨, 但都没有把由于盐淡水交汇形成的盐水入侵锋作为一特定对象加以讨论。

1 研究方法

在对1959—1988年部分年份观测资料¹⁾的计算分析基础上, 对长江口各入海通道盐度锋的确定、分布及其特性作了研究, 并试图利用密度佛氏数 F'_s 的计算结果, 探讨盐度锋在河口最大浑浊带形成过程中的贡献。

1.1 资料来源及其选用 选用南港-南槽1959年以来12个测次的纵向水文观测值(1959年3月、8月, 1960年2月, 1963年3月、7月、12月, 1975年7月, 1978年8月, 1986年1月、8月, 1988年7月、12月); 南港-北槽选用4个纵向测次(1972年9月, 1978年8月, 1988年7月、12月); 北港也选用4个测次(1959年3月、8月, 1975年1月, 1978年8月); 北支选用2个纵向测次(1982年12月, 1986年7月)。观测期间长江大通站流量在8 000—49 000 m³/s, 中浚站潮差在1.6—4.0 m, 基本上包括了长江口出现的不同流量和潮差的组合类型, 具有较好的代表性。

* 国家自然科学基金资助, 9487005-01号。茅志昌, 男, 出生于1949年7月, 副研究员。

本文承沈焕庭教授审阅, 并提供宝贵意见; 宋德芳同志绘图, 谨致谢忱。

1) 由本所和上海航道局提供。

收稿日期: 1993年4月8日, 接受日期: 1994年10月19日。

1.2 盐度锋区及锋面的确定 锋的概念最早用在气象学上,表示两个不同温度的气团交汇之界面。目前海洋学上广泛应用的锋是指毗邻的两个不同性质水团之交界面。在交界面附近,各水文要素梯度加大,水体稳定度减小,锋环流作用明显。

确定海洋锋的方法很多,标准也随域而异,根据研究对象的不同,采用的要素也不同。目前国内外学者普遍根据水文要素(盐度、温度、流速、密度等)的梯度确定之。我国学者在研究黄、东海海洋锋时,多以盐度水平梯度 $\Delta s/\Delta x \geq 0.5-1.0/30 \text{ mile} (\Delta s/\Delta x \geq 0.009-0.018 \text{ km}^{-1})$ 为统计标准。据现有资料分析,长江口盐度锋水平梯度以 $\Delta s/\Delta x \geq 0.4 \text{ km}^{-1}$ 为统计标准较合适。

本文利用长江口的4条入海通道共22个测次的纵向资料,选择涨落憩两个特定时刻,分别绘制纵向盐度剖面图,根据各水层水平向盐度梯度由小到大和由大到小的分布特点,截取其变化最大处作为锋区的内边界和外边界,内边界到外边界的距离为锋区宽度。

长江河口盐淡水混合除北支外,以缓混合型为主。海水在下层上溯,淡水在上层下泄,两种不同密度的流体成倾斜面接触。在这个倾斜面上,既有水平盐度梯度,又有垂向盐度梯度,因此,总能找到水平和垂向盐度梯度都达最大的一个面,这个面即为盐度锋的锋面。锋面是锋区内“密度力”最强所在的空间剖面。

2 结果

2.1 盐度锋的分布及其特征 长江口径流量大,潮流亦强,盐淡水混合作用非常强烈。若按含盐度0.05作为盐淡水混合区的上边界,30作为下边界,则盐淡水交汇区延伸百余公里。在长江口各汉道的拦门沙部位,存在一个水平盐度梯度最大的盐度锋,这个锋区终年存在,并随径流丰竭与潮流强弱而发生位置的迁移和强度的变化,长江河口最大浑浊带的形成及盛衰与其密切相关。

2.1.1 盐度锋分布 盐度锋范围随洪、枯季,大、小潮及涨落潮发生迁移变化,而洪、枯季变化最为明显。图1为洪季盐度锋所在范围示意图。

南港-南槽 洪季锋区多在小九段下游20—60 km的范围内移动。枯季,当大通流量降至10 000 m^3/s 以下,出现双锋带,在一个潮周期内,前锋带在小九段上下游约20 km内摆动,含盐度为1—6;后锋带在小九段下游28—35 km,含盐度在10—20之间。随着流量增加,锋区下移。1988年7月,大通流量为33 700 m^3/s ,锋区在小九段下游8—35 km内迁移。1986年8月,大通流量为44 600 m^3/s ,涨憩时刻,锋带上推到小九段下游48 km处,落憩时刻退至九段沙沙尾附近。若流量增到50 000 m^3/s 以上,落憩锋带可退至-10 m等深线附近。

南港-北槽 洪季锋带大多在横沙水文站下游5—30 km内摆动。枯季盐度锋有时伸入南港,与南港-南槽上溯盐水汇合一体。1978年8月,大通流量近30 000 m^3/s ,涨憩时入侵锋伸至横沙水文站一侧,落憩时锋区下移20 km。1988年7月大通流量33 700 m^3/s ,入侵锋伸入横沙水文站上游约3 km的南港,落憩下退16 km。1988年12月,流量降至10 500 m^3/s ,涨落憩时刻的盐度锋在南港和横沙水文站下游5 km内摆动。

北港 锋带位置与南北槽相比,位于最外部。1959年8月,大通流量为48 700 m^3/s ,涨憩时锋线在横沙东滩串沟的北侧(距堡镇港40 km),落憩锋线退至东经122°15'附近。1978年8月,涨落憩锋面在堡镇下游25—45 km内伸退。1984年11月曾在奚家

港外侧测得涨落憩盐度分别为 8.06, 1.89; 1992 年 2 月在青草沙西北侧北港内测得盐度 1.2。由此可见, 洪季北港锋区位置在团结沙南侧至东经 122°15′ 之间约 40 km 范围内, 枯季盐水入侵锋可上溯到奚家港附近河段, 有的年份可及堡镇港断面。

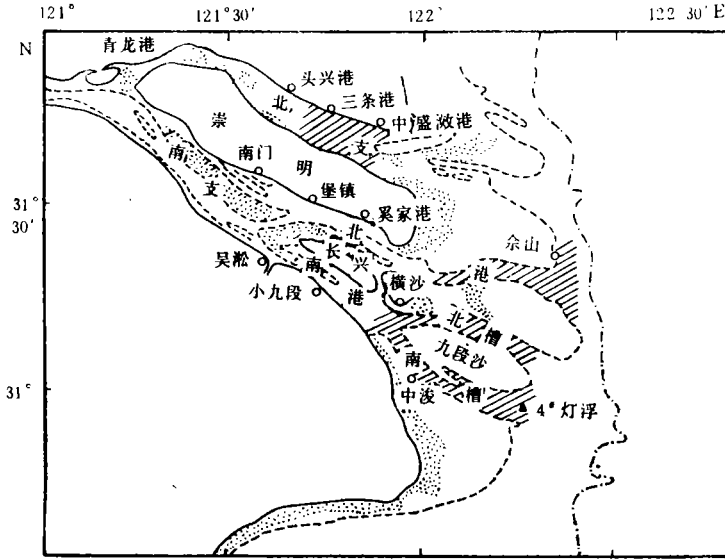


图 1 洪季长江口盐度锋位置

Fig. 1 Location of salt fronts in the Changjiang River Estuary during flood seasons

北支 纵向同步观测资料极少。现据 1982 年 12 月和 1986 年 7 月资料分析, 洪季锋区在头兴港—中盛激港, 滞流点在头兴港下端, 最大浑浊带现象非常明显, 核心部位含沙量高达 13.5 kg/m³ (茅志昌等, 1993), 居其余 3 条通道之首。1982 年 12 月锋区在三和港至三条港之间。近年来, 北支的咸潮入侵强度有所减弱, 但在枯季(主要在 1—3 月) 仍有盐水上溯到青龙港, 倒灌南支。1987 年 2 月, 青龙港最高氯化物为 14 288 mg/L, 三条港为 16 633 mg/L, 含盐度达 25 × 10⁻³ 以上, 而同期吴淞的最大值只有 3 110 mg/L。洪季, 三条港以上河段受淡水控制, 滞流点退至头兴港附近, 这与北支的最大浑浊带和淤积部位相对应的。

锋区的伸退迁移主要受控于流量和潮差, 根据南港—南槽 12 个测次的纵向资料绘制出图 2。可知, 盐水入侵锋上溯距离与大通流量和中浚站潮差关系密切, 均呈反比关系。

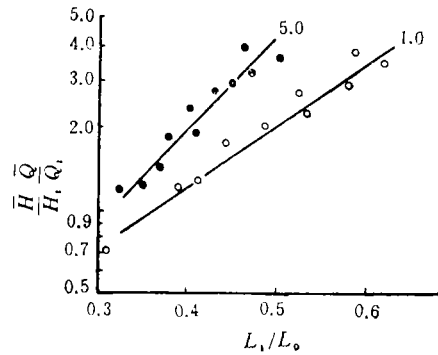


图 2 $\bar{Q}Q_i/\bar{H}H_i$ 同 L_i/L_0 的关系

Fig. 2 The relation of $\bar{Q}Q_i/\bar{H}H_i$ with L_i/L_0 . \bar{Q}, Q_i 为大通站多年平均流量及观测日前 4 天流量; \bar{H}, H_i 为中浚站的多年平均潮差及观测期间的潮差; L_i 为盐水入侵端点至 4 号灯浮距离; L_0 为徐六泾至南槽 4 号灯浮距离。

2.1.2 盐度锋特征 据大量实测资料和盐度分布图的统计分析,长江河口盐度锋有如下几个特征。

长江口各入海通道盐度锋全年存在,枯季上溯,洪季下移,年内移动幅度不同汉道有所差别。南港-南槽 40—60 km,南港-北槽 20—40 km (若入侵锋面超过九段沙头,归属南港-南槽);北港 30—45 km;北支情况有所不同,枯水期,盐水入侵可达青龙港,倒灌南支,洪季入侵锋一般可达头兴港以下河段,落憩时锋线退至北支海口附近。锋区内年迁移幅度主要与各汉道的径、潮流量比率有关,比率愈小,锋区伸退幅度愈大。经计算,径、潮流比率大小依次为北支<南槽<北槽<北港,相应地锋区内年变幅为北支>南槽>北槽>北港。

锋面形态有三类:即垂直、倾斜和楔状型,对应于垂向均匀、部分混合和高度分层 3 种盐淡水混合类型。若大通流量在 $10\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 以下,潮差在 2.5 m 以上,锋面多呈垂直型;大通流量在 $45\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 以上,又遇小潮,锋面多呈楔状型;在这两者之间,多为倾斜型。全年以倾斜型为主。北支潮流量远大于径流量,以垂向均匀混合为主,锋面多呈垂直型。

盐度锋面在一个潮周期内,随着涨落潮流速的变化,也会出现不同类型的转化。从落憩到涨憩,随着潮流产生的底切应力增大,垂向湍流混合增强,等盐线由楔状变为倾斜状,至涨憩,等盐线坡度最陡,从涨憩至落憩,一方面由于涨潮流的底部切应力减弱,落潮流的掺混作用有限,另一方面表底层的平流效应比较强,等盐线倾斜度加大,又成为楔状型。

以盐度梯度的大小可作为判别盐度锋强度的标志,长江口盐度锋强度一般在 $0.4\text{—}2.0\ \text{km}^{-1}$, 远比东、黄海盐度锋强度大,也高于杭州湾锋面强度(王康璋等,1992),属强锋型。盐度锋强度具有洪季大于枯季,底层大于表层,落潮大于涨潮等特点。洪季径流量大,阻遏海水上溯的力量比枯季强,锋区宽度相应缩窄,强度普遍在 $0.6\text{—}2.0\ \text{km}^{-1}$, 枯季大多在 $0.4\text{—}0.6\ \text{km}^{-1}$ 。

锋区宽度洪季为 3—20 km, 枯季为 5—30 km。锋区盐度范围在 1—20, 锋区的内界面盐度为 1—5, 外界面盐度为 10—15, 少数为 10—20。

如前所述,锋面为水平和垂向盐度梯度最大点之连线,锋面对应的等盐线为 3—5。

河口区为双向流,在以下泄流为主转变为以上溯流为主的河段,在一个潮周期内,其间总是有一个净流程为零的地方,称为滞流点。滞流点随径、潮流的变化而作上下移动,实际上是一个滞流区。滞流点位于涨落憩锋面之间,滞流点附近,下层水体含沙量往往比上下游要高出许多,反映了滞流点与河口最大浑浊带关系非常密切。

2.2 确定盐度锋区和滞流点部位的判据 利用密度佛氏数的计算值作为锋区和滞流

点部位的判据。密度佛氏数的表达式为 $F'_x = \frac{V_f}{\sqrt{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_x gh}}$, 其中 V_f 为淡水流速 (m/

s); $V_f = fV$, f 为淡水分值, $f = \frac{S_0 - S_x}{S_0}$; V 为实测流速 (m/s); S_x 为两个潮周期内的垂线平均盐度; S_0 为长江口外盐度,取 30; h 为水深 (m); g 为重力加速度 (m/s^2); $(\Delta\rho/\rho)_x$ 为盐水入侵河段测点垂线平均密度与淡水密度的相对比值,可用下式求得 (Ha-

rlmam, et al., 1969):

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_x = \frac{0.7}{1\,000} S_x$$

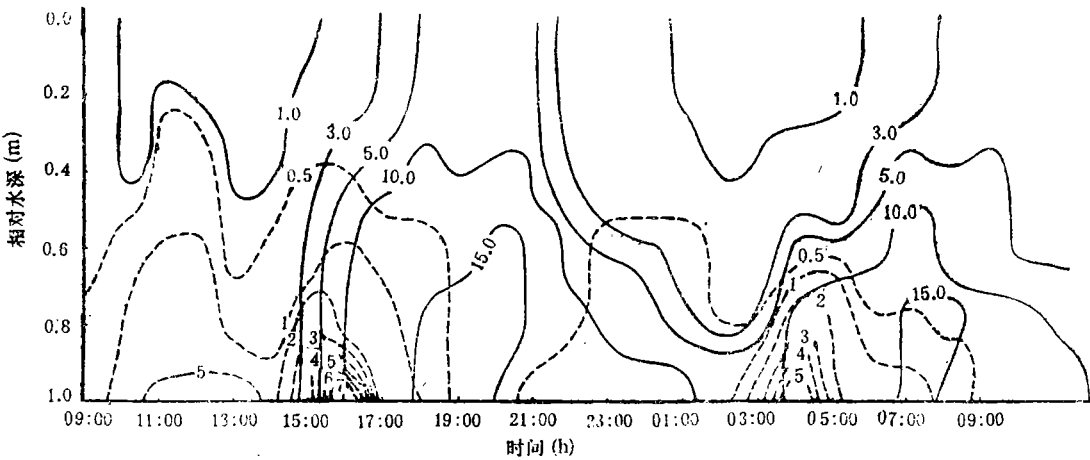


图3 在两个潮周期内含盐度、含沙量过程线

Fig. 3 Curves of salinity and suspended sediment concentration during double tidal cycle
----含沙量 (kg/m^3); ——含盐度。

根据长江河口多处实测资料的计算结果,可作如下判别: $F'_x > 10$ 以径流作用为主; $F'_x < 0.1$ 以潮流作用为主; $0.1 < F'_x < 10$ 为盐度锋进退活动带。当 $F'_x = 1$ 时,对应位置为滞流点。 F'_x 为无量纲数,其值不随径、潮流变化而改变,我们可以利用 F'_x 的判据预测盐度锋区的迁移范围和滞流点位置,从而也就知道最大浑浊带的进退活动区域。

2.3 盐度锋对最大浑浊带的贡献 长江口悬沙的粘土矿物成分主要为伊利石、高岭石和蒙脱石,这种矿物在盐水中易胶化,发生絮凝,絮凝后的颗粒沉速可增大 1.2 个数量级。图 3 为滞流点附近的一个测点,在两个潮周期内的含盐度、含沙量过程线图。在相对水深 0.4 以上,含沙量较低,大多在 $0.3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 以下,而在近底层出现两个高含沙量区,中心最大值达 $7 \text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $5 \text{ kg}/\text{m}^3$,对应的盐度为 3—10。长江口各汉道的下层高含沙量(最大浑浊带)所在区域对应的含盐度均在 1—20 之间,这与盐度锋区的含盐度范围是一致的,说明盐度锋进退地区是泥沙絮凝沉降的活跃河段。

在双向流的潮汐河口存在滞流点,滞流点附近的水体稳定性最差,垂向湍流最强,形成重力环流。涨落潮流挟带的来自上下游两个方向的泥沙在滞流点附近聚集,形成高含沙量区。图 4 表明,最大浑浊带、滞流点和涨落憩锋面的部位是接近的,同时锋区在潮周期内的伸退范围与 F'_x 的判据是相符的。滞流点附近的非潮汐重力环流对形成最大浑浊带的贡献主要体现在洪季。根据 1986 年 1 月资料绘制图 5。观测期间大通流量为 $9\,500 \text{ m}^3/\text{s}$,表层含沙量在 $0.08\text{—}0.29 \text{ kg}/\text{m}^3$,近底层在 $0.25\text{—}0.74 \text{ kg}/\text{m}^3$ 之间,滞流点附近未形成明显的高含沙量带。盐度锋面附近,由于密度坡降作用,改变了水流形态,形成滞流点和重力环流,为最大浑浊带的形成提供了必要条件,但不是充分条件,还要视长江来沙量的多少。据大通站多年资料统计,洪季含沙量约为枯季的 10 倍,加之洪季水温高,水流

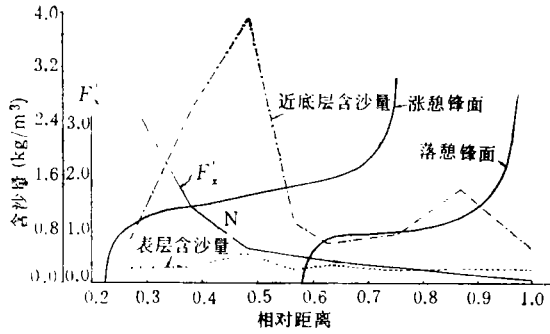


图4 南槽盐度锋面线、含沙量、 F'_x 纵向分布图(洪季)

Fig 4 Longitudinal distribution of the salt front, suspended sediment concentration and F'_x in the South Passage (flood season)

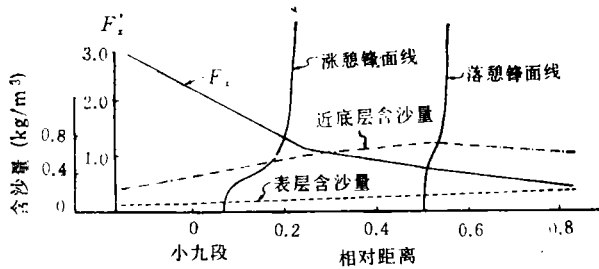


图5 南槽盐度锋面线、含沙量及 F'_x 纵向分布图 (1986.1)

Fig. 5 Longitudinal distribution of the salt front, suspended sediment concentration and F'_x in the South Passage (1986. 1)

粘性小,相应地增加了絮凝团的沉速。

3 结语

长江口各入海通道的盐水入侵有4个特性:(1)盐度锋全年存在,枯季上溯,洪季下退,锋区在年内移动幅度各汉道有所不同,变幅与径潮流流量比率成反比关系;(2)锋区强度一般为 $0.4-2.0 \text{ km}^{-1}$,属强锋型;(3)锋区宽度与流量成反比,锋区盐度在1-20之间,与最大浑浊带区域的含盐度范围相吻;(4)盐度锋线为水平和垂向盐度梯度最大点之连线,锋线对应的等盐线为3-5。

利用实测资料计算的密度佛氏数 F'_x 值可以作为确定盐度锋区和滞流点部位的判据。

盐度锋对河口最大浑浊带有两个贡献:有利于长江口细颗粒泥沙絮凝沉降;在盐度锋线附近形成重力环流,具有“捕沙器”的功能,有利于河口最大浑浊带的形成和发育。

参 考 文 献

王康璋、苏纪兰, 1992, 杭州湾锋面的结构特征, 中国海洋学文集, 海洋出版社(北京), 13-21。
 茅志昌、沈焕庭、姚运达, 1993, 长江口南支南岸水域盐水入侵来源分析, 海洋通报, 12(3): 15-25。
 翁学传、王从敏, 1984, 台湾暖流水(团)夏季 T-S 特征和来源的初步分析, 海洋科学集刊, 21: 113-133。
 Harlemam, D. R. F. and Ippen, A. T., 1969, Salinity intrusion effects in estuary shoaling, *Ameri. Socie. Civil Engin.*, 95:9-27.

A STUDY ON SALT FRONTS IN THE CHANGJIANG RIVER ESTUARY

Mao Zhichang

(*Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062*)

ABSTRACT

Based upon the observed data of partial years from 1959 to 1988, using 22 times of longitudinal hydrological field data of the South and North Channels, the South and North Passages, North Branch in the Changjiang River Estuary, calculations and analyses have given locations and features of the salt fronts in the 4 waterways.

Based on calculations of the densimetric Froude number, the zone of up-downstream for the fronts and location of null point are determined in the channels of Changjiang River Estuary.

It is indicated that the front plays two roles in the process of the turbidity maximum. Salinity of the front zone is beneficial to flocculation. The gravitational circulation in the front zone leads to convergence of sediments from up-downstream.

Key words Salt fronts Null point Mixing of salt-freshwater Gravitational circulation Densimetric Froude number