

# 长江河口环流及其对悬沙输移的影响\*

沈焕庭 朱慧芳 茅志昌

(华东师范大学河口海岸研究所, 上海)

## CIRCULATION OF THE CHANGJIANG RIVER ESTUARY AND ITS EFFECT ON THE TRANSPORT OF SUSPENDED SEDIMENT

**编者按:** 本文英文稿已于1982年于美国科学院出版的《河口类比》(“Estuarine Comparisons”)一书中的677—691页上刊出, 文章以长江口的大量实测水文、泥沙资料对长江口的水流结构及其对输沙的影响进行了较深入地分析研究, 对当前综合治理长江口很有参考价值。本刊应部分读者的要求, 请作者撰写了中文稿, 除增加了两幅图稿外, 在内容方面也作了一些修改和补充, 以飨读者, 特此发表。

**提要** 本文根据大量实测资料着重分析长江河口的混合类型、环流模式及其对悬沙输移的影响。研究表明, 长江口的混合类型随洪枯季、大小潮而变, 又因地点而异, 北支以C型为主, 北港、北槽、南槽以B型为主。北港、北槽和南槽在径流、潮流、盐淡水异重流共同作用下, 存在上层水流净向海, 下层水流在滞流点下游净向陆的河口环流。悬沙输移模式和河口环流模式相似。最大浑浊带、浮泥、航道拦门沙的位置及变化规律与滞流点相一致, 其形成和变化与河口环流密切相关。

关于长江河口环流模式的特征、成因及其对通海航道淤积的作用, 已愈益为人们所关注。六十年代以来, 围绕改善长江口通海航道的通航条件, 有关生产和科研单位曾进行过多次水文泥沙测验, 并做了一些分析研究工作。本文试图根据大量实测资料, 在前人研究的基础上, 着重分析长江河口的混合类型、环流模式及其对悬沙输移的影响。

### 盐淡水混合类型

由于径流、潮流、河宽和水深的变化, 各个河口都有自己特有的盐、淡水混合类型。Pritchard, Cameron 和 Pritchard 曾按河口分层及其盐度分布特性对河口进行了分类, 把河口区分为四种不同的混合类型<sup>[3,6]</sup>: A型——高度分层型或称盐水楔型; B型——部分混合型; C型——垂直均匀混合型; D型——断面均匀混合型。每种混合类型具有各自不同的密度分层和环流模式。

\* 本文承陈吉余教授、潘定安、徐海根同志提供宝贵意见, 谨此致谢。

收稿日期: 1983年5月25日。

A型常发生在潮差小、径流作用强、宽深比相对较小的河口,如美国密西西比河的西南水道、我国珠江正干河口。B型常出现在潮流和径流作用都比较强的河口,如美国切沙皮克湾和哈德逊河口。本文讨论的长江河口也以B型为主。C型多见于潮流作用强、宽深比较大的河口,如美国的特拉瓦湾,英国的泰晤士河口,我国的钱塘江河口和瓯江河口。D型河口在自然界中可能不存在(Cameron and Pritchard<sup>[3]</sup>, Dyer<sup>[4]</sup>),但这定义对垂向或横向均匀混合的假设是有用的,它已在数值与解析模式中产生了现实的效果。

应予指出,河口的四种混合类型是很难确定的,因为它们仅是一个或多或少连续的谱或序列中的四个点。另外,在任意给定时刻,在同一河口内部的不同河段,可以存在不同的盐度结构和环流类型,这就使事情更趋复杂。可见,河口混合的程度以及它在河口序列中的位置,在很大程度上取决于径流和潮流的比值,当然,河口的几何形态也有一定作用。随着径、潮流的天然变化以及由人为的引水、疏浚、抛泥等引起的这些参数的变化,同一河口可从一种混合类型转化为另一种混合类型。

长江口在徐六泾以下被崇明岛分隔为南支和北支,南支在浏河口以下被长兴、横沙等岛分隔成南港和北港,南港在横沙以下又被九段沙分隔成南槽和北槽,故目前长江口有南槽、北槽、北港、北支等四条入海汉道(图1),这些汉道的径流量、进潮量以及河槽几何形态各不相同,从而混合类型也各有差异。

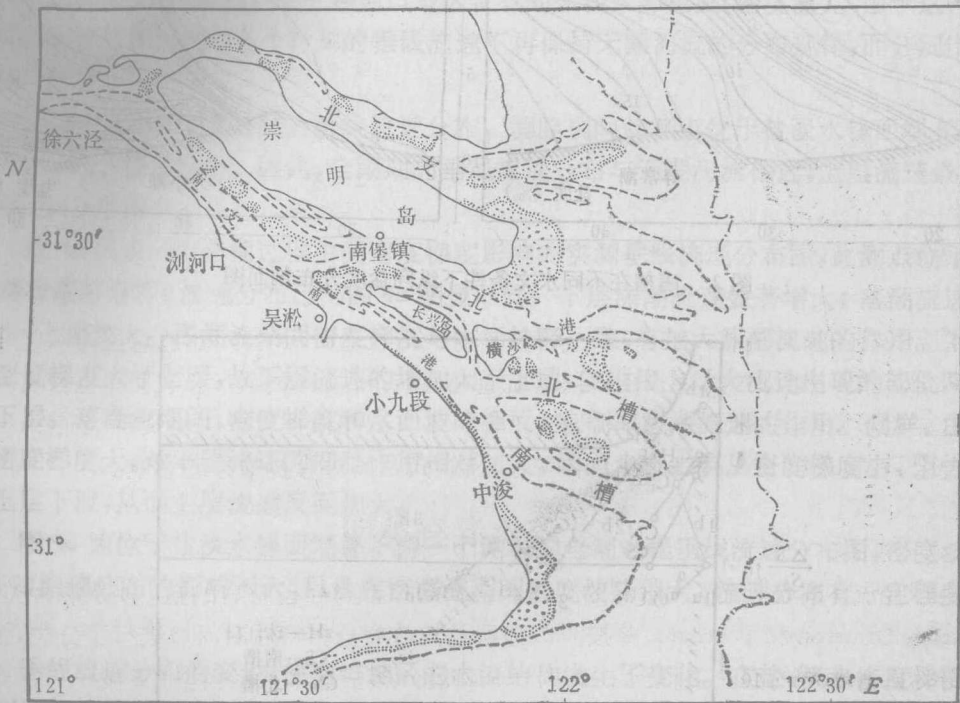


图1 长江口形势图

北支是一条断面骤然收缩的汉道,平面外型呈喇叭形。本世纪以来,进入北支的径流量不断减少,1915年尚占25%,到1958年已不到10%。1959年后,在大潮期间已有大量海水倒灌入南支。潮差比南支干流约大25%。因此,潮流作用远大于径流,呈现出C型

混合。

北港、北槽和南槽这三条汉道,无论是径流流量、潮差或几何形态,均与北支不同;混合类型也与北支有较大差异,一般以 B 型为主,有时也会出现 A 型和 C 型。

径流在各个汉道的分配对混合程度有较大影响。南、北港和南、北槽的径流分配是:1958 年以来,北港的分流量在大多数年份大于南港;1965 年以后,南槽的分流量一直小于北槽。在潮差相近情况下,径流分流量多,混合程度较弱,反之混合则加强。因而这三条汉道虽然都以 B 型为主,但混合强度南槽大于北槽,北槽大于北港。

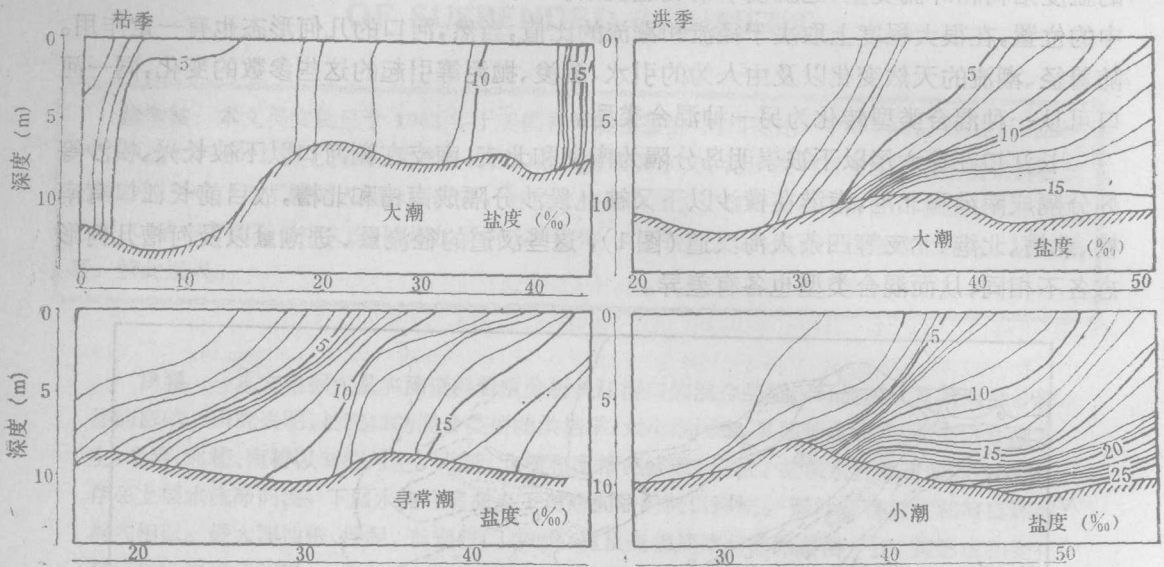


图 2 南槽在不同水文条件下纵向盐度分布剖面图

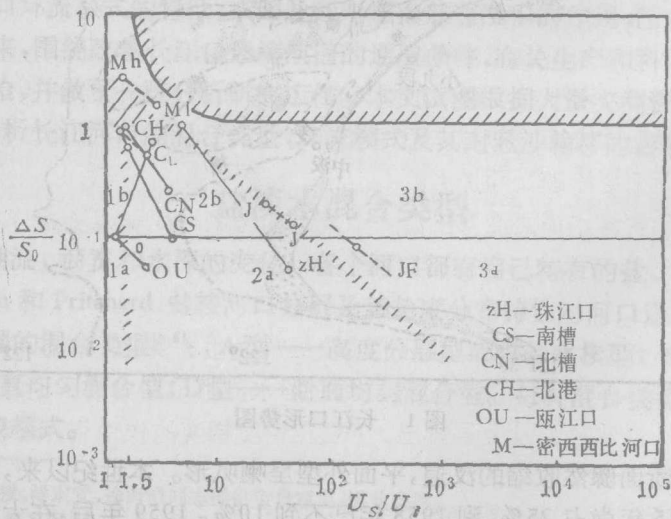


图 3 河口分类图解

长江径流有明显的洪、枯季变化,潮流有明显的大小潮变化,这就使得同一汉道在不同时间出现不同的混合类型。图 2 是南槽洪季大潮和小潮、枯季寻常潮和大潮的盐度纵向剖面图<sup>1)</sup>,由图可知,在洪季大潮和小潮以及枯季中潮期间属 B 型混合,枯季大潮期间,盐淡水混合比较强烈,垂向盐度差很小,属 C 型混合。由此可见,南槽盐淡水混合状况是洪季与枯季不同,大潮与小潮不同,有明显的周期性变化,但从全年来说,以 B 型混合为主。北槽和北港也有类似的变化规律。

用分层-环流图解<sup>1)</sup>也可得出与上述同样的结论。此图用两个无尺度参数来确定混合类型,纵坐标是分层参数  $\Delta S/\bar{S}_0$ ,表示底表层盐度差 ( $\Delta S$ ) 与断面平均盐度 ( $\bar{S}_0$ ) 之比;横坐标是环流参数  $U_s/U_f$ ,表示表层净流速与断面平均淡水流速之比。由于缺乏断面资料,故取垂线平均值,这样  $U_s$  为表层净流速,  $U_f$  为测站垂线平均流速乘以该测点的淡水分值。利用 1978 年 8 月观测资料进行计算,其结果见图 3。从图中可见,无论是南槽、北槽或北港都集中在 2b 靠近 1b 一侧,均以部分混合占优势,但层化程度是北港比北槽明显,北槽又比南槽明显。

## 河口环流模式

以 B 型为主的南槽、北槽和北港下段,在水平方向和垂直方向均有明显的密度梯度存在,在此种梯度作用下,产生一种河口地区特有的盐淡水异重流(密度流)。由于这种流的存在,使涨落潮过程中各个时刻的垂线流速不再保持无潮河流的分布规律,而分别出现特殊形状<sup>2), [2]</sup>。

图 4a 为一个全潮过程的垂线流速分布,测验期间此测点位于盐淡水锋面端部的上游,受盐水入侵影响小。因此,全潮期的垂线流速分布与无潮河流相近,上层流速最大,中层次之,下层最小。

图 4b 代表一个全潮过程中受密度梯度影响的实测垂线流速分布图,此测点位于盐淡水锋面端部附近,流速分布已与图 4a 明显不同:下层涨潮流速显著增大;落潮流速下层减小、上层加大。涨潮流期间密度梯度与水面坡降一致,有加大涨潮流速的作用。下层由于密度梯度大于上层,故下层流速的增加大于上层,使垂线上最大流速出现的部位降低至中下层。落潮流期间,密度梯度和水面坡降相反,有削减落潮流速的作用。同样,由于下层密度梯度大,对下层流速的抑制作用相对加大,因而水流主要从密度梯度小、阻力较低的上层下泄,从而上层流速反而加大。

图 4c 为位于盐淡水锋面端部下游一个测站的全潮过程垂线流速分布图,密度坡降甚小,对流速分布的影响不大,只是在落潮流期间密度坡降稍大,流速分布有一定程度的变形。

垂线流速分布的变形,使河口地区的水流结构发生了变化。在盐、淡水密度梯度影响不明显的河口上段,一个潮周期内从表层到底层水流都是净向海下泄的。在受密度梯度影响明显的河段,淡水径流从上层排出,下层在密度梯度的作用下,涨潮流程大于落潮流

1) 韩乃斌等,1973。长江口盐水楔异重流对拦门沙航道的作用。南京水利科学研究所。

2) 易家豪,1964。长江口铜沙江亚地区盐水楔异重流初步分析。南京水利科学研究所。

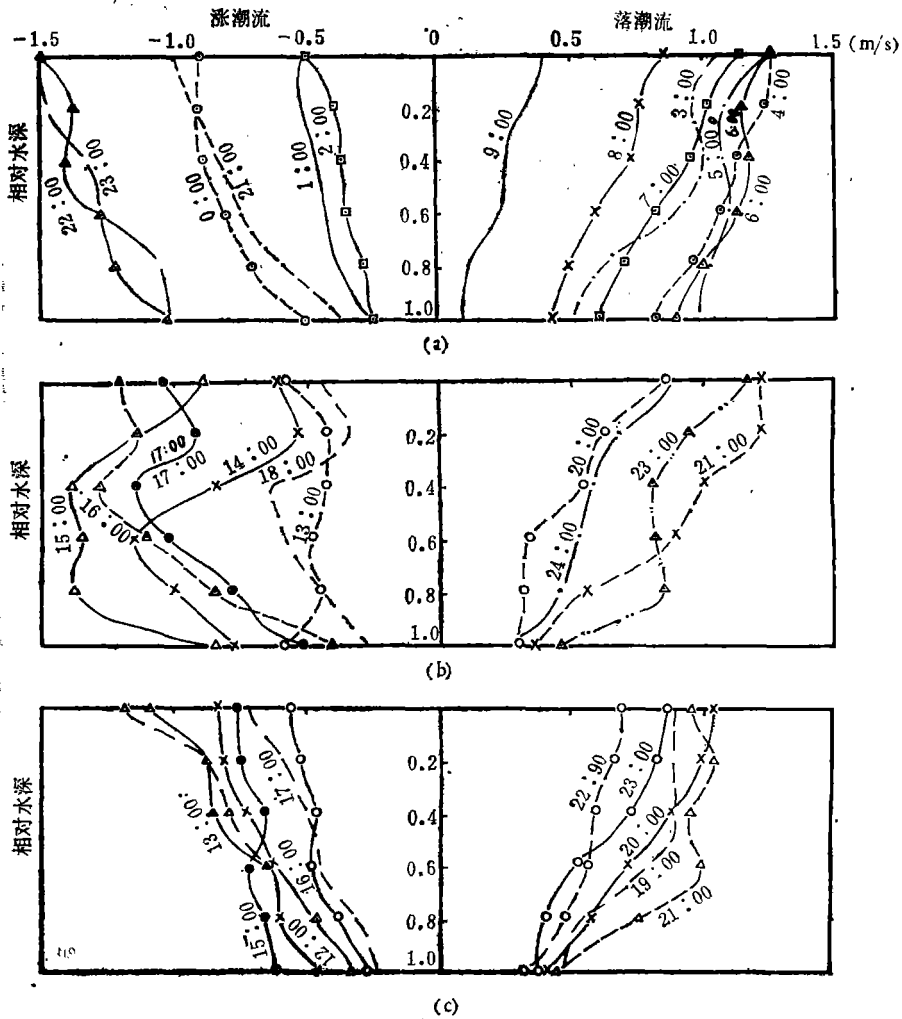


图4 垂线流速分布图

(a) 滞流点上游; (b) 滞流点附近; (c) 滞流点下游。

程,产生净向陆的上溯流。上溯流在上溯过程中有盐水不断掺混到上层水体,这样,在盐水入侵区就构成了一个上层净向海下层净向陆的垂向环流。

图5是根据1978年8月纵向同步观测资料计算得出的北港、北槽、南槽的环流图式。图中的净流程是通过两个潮周期(一个高高潮和一个低高潮)的平均取得的。从图中可见,三条入海汉道均存在环流,然而由于混合程度的不同,其强度和结构均存在着差异,其主要表现如下。

1. 在以下泄流为主转变到以上溯流为主的河段,其间有个净流速为零的“滞流点”,此点位于南槽最靠里、北港最靠外、北槽居中。这与三条汉道的径流分配显然是相适应的。

2. 从上层以下泄流为主转变到下层以上溯流为主,其间有个净流速为零的“零速度面”,此面离水面的深度是北港最大、南槽最小、北槽居中。这与三条汉道的潮汐作用强度也是相适应的。

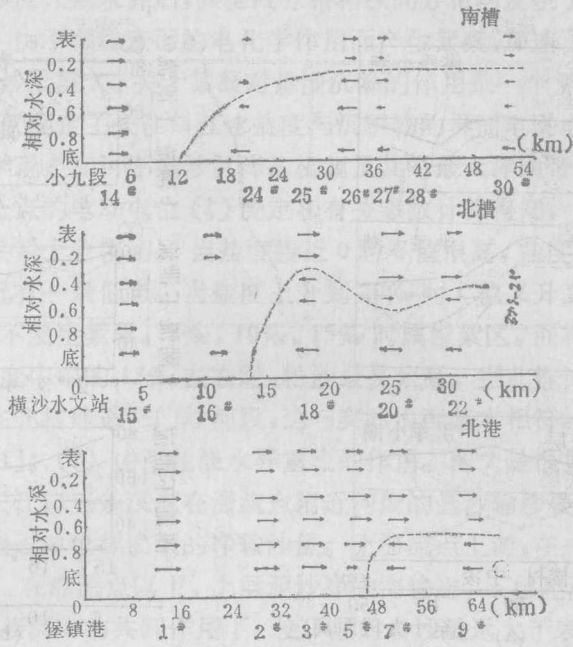


图 5 长江口纵向环流剖面示意图

3. 在涨落潮流流路分歧河段的水流结构显得特别复杂。如有一测点的净流程，表层向海，0.2m 层(相对水深)向陆，0.4m 层又向海，0.6m 层以下又向陆。这主要是受附近涨潮槽水流的影响所致。

图 6 分别代表南槽、北槽和北港三条汉道在不同水文条件下表、底层优势流 $\rho$ 的变化情况,从图中不难看出环流的时空变化:

1. 表层的优势流,不论洪、枯季和大、小潮,其值一般都超过 50%,均为下泄优势流。这表明淡水径流至长江口门地区后主要通过上层下泄入海。

2. 无论洪、枯季和大、小潮,三条汉道的下层都有上溯优势流存在。不过强度和范围都有所不同。小潮期由于潮流的紊动作用弱,密度梯度的作用相对加大,使下层上溯流的强度增强,流程比大潮时长。洪季,径流量增大,上溯优势流的部位向海方向推移;枯季,径流量减小,上溯优势流的部位向上游推移。可见,滞流点的位置是不断变化的,它随径流量多寡和潮差大小作上下推移,实际上是个滞流区。

3. 三个汉道滞流区的位置不尽相同。南槽滞流区洪季一般在铜沙浅滩滩顶附近,枯季一般在南港下口的九段附近。1978 年洪季因流量比常年显著偏小,滞流区上溯到南港的下段,相当于一般年份枯季滞流点的位置。北槽的滞流区洪季一般在北槽涨潮槽下口的航道拦门沙附近。北港的滞流区洪季在北港拦门沙的外浅滩附近,枯季在内浅滩附近。

综上所述,环流的形成与盐淡水异重流的作用有关。但应予指出,长江口的径流和潮流力量都很强,在量值上比异重流大很多倍。因此,只有在径、潮流这两股强劲动力处于势均力敌相对平衡的河段,盐淡水异重流才能在河口环流的形成中显示其重要作用。也

1) 所谓优势流,就是落潮流速过程线与横坐标所包的面积除以涨落潮流速过程线与横坐标所包面积之和,其商如大于 50% 的称落潮优势流或称下泄优势流,小于 50% 的称涨潮优势流或称上溯优势流,等于 50% 的称滞流点。

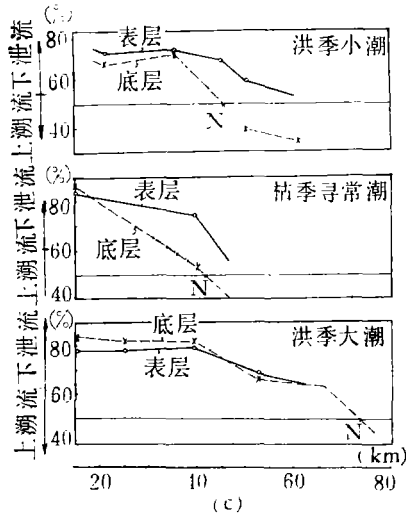
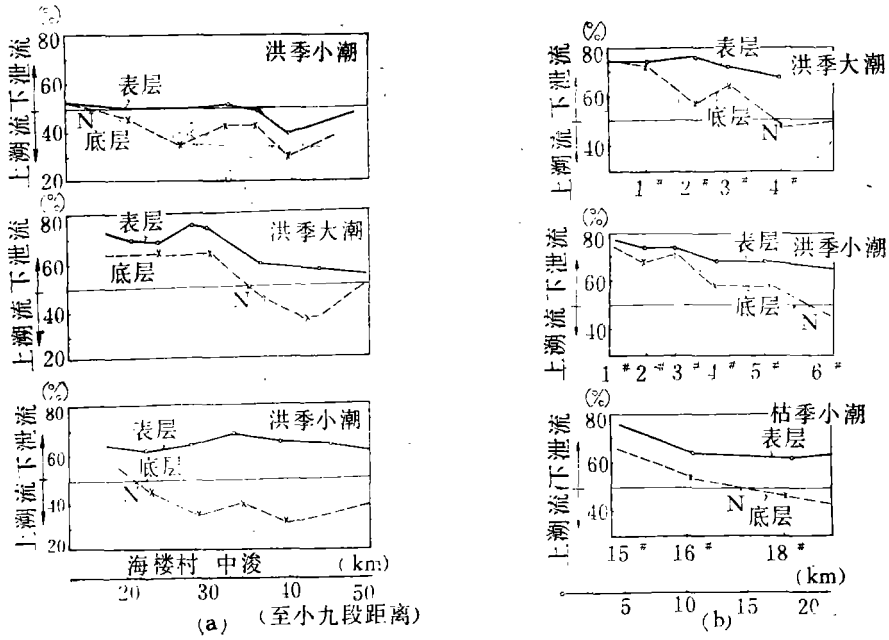


图6 优势流沿程变化图

(a) 南槽; (b) 北槽; (c) 北港。

就是说,在长江口,由河口环流导致的滞流点的形成是径流、潮流和盐淡水异重流共同作用的产物,其中径、潮流势力的相对平衡是基础,盐淡水异重流是在这基础上的迭加因素。

### 环流对悬沙输移的影响

河口环流对悬沙输移影响的重要性已在世界上许多河口被证实。这种影响在长江口突出地表现为最大浑浊带、浮泥和航道拦门沙的形成与变化均与河口环流密切关联。

悬沙随径流进入潮流界后,虽有两向水流存在,但涨落潮流含沙量的垂线分布基本上

与河流相同。当悬沙进入盐水界后,其垂线分布和纵向分布均发生了变化,这种变化主要来自两个方面:(1) 由于颗粒表面的电化作用而产生絮凝,加速了泥沙的沉降,使上层含沙量减小,下层含沙量增大。关于絮凝对悬沙沉降的作用是一个复杂问题,我校从1973年开始,用流动电位仪测定了长江口江水盐度与沉积物的界面电动电位的关系,从沉积物颗粒絮凝的物理化学观点探讨了悬沙沉降的机制及其对最大浑浊带形成所起的作用。

从北槽纵向七个点的电动电位( $\zeta$ )测定和有关参数计算得知,粉沙在水溶液中的电动电位变化与盐度关系十分密切。当盐度接近0时 $\zeta$ 值很高,盐度增加到5‰时 $\zeta$ 值迅速下降,在13‰附近有一最低点。当盐度上升到20‰时 $\zeta$ 值又升高。盐度为0,20‰时接近稳定区,基本上不发生絮凝。5‰,10‰,15‰时属慢絮区,而在13‰时属较快絮凝区,即在0—20‰盐度中中的13‰左右时,粉沙最易絮凝。据此推论,絮凝作用最强所对应严重的沉积区即在北槽航道拦门沙河段,这与实际情况基本相符。关于这方面较详细的报道请看参考文献[1];(2) 由于盐淡水异重流的作用。图7是根据1978年洪季实测资料计算结果绘制的长江口三条汉道在滞流点附近河段的悬沙输移模式。图中的净输沙量系指两个潮周期中通过单位截面积的净输沙量。于滞流点上游,在一个潮周期中,上下层泥沙都净向海输送。在滞流点以下,上层泥沙净向海输送,下层泥沙却净向陆输送。这样,在河口环流和絮凝沉降的共同作用下,使下层的含沙量远大于表层。同时,在滞流区附近,由于从下泄优势流转变为上溯优势流,净流速接近于零,从上游下泄的泥沙和从下游上溯的泥沙都向这里积聚,从而在其下层,往往形成最大浑浊带。

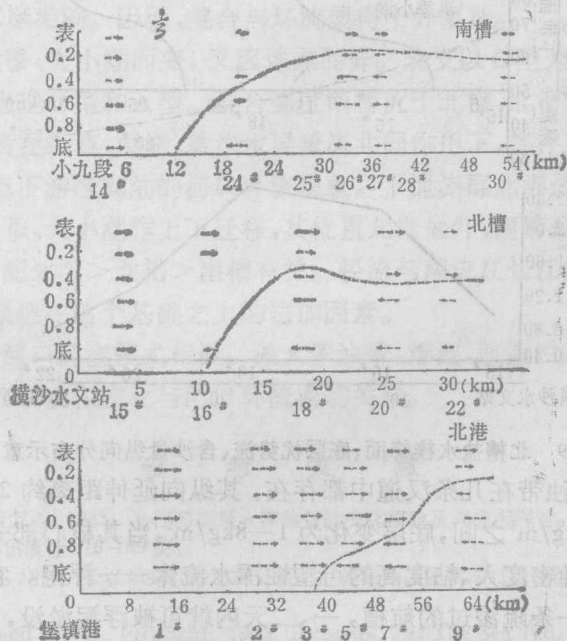


图7 长江口纵向泥沙输送剖面示意图

将图7与图5比较,两者十分相似,所不同者是南槽铜沙浅滩滩顶附近的水和沙的净下泄层的厚度不同。水流净下泄层一般只局限于表层,而悬沙净下泄层可从表层伸展到



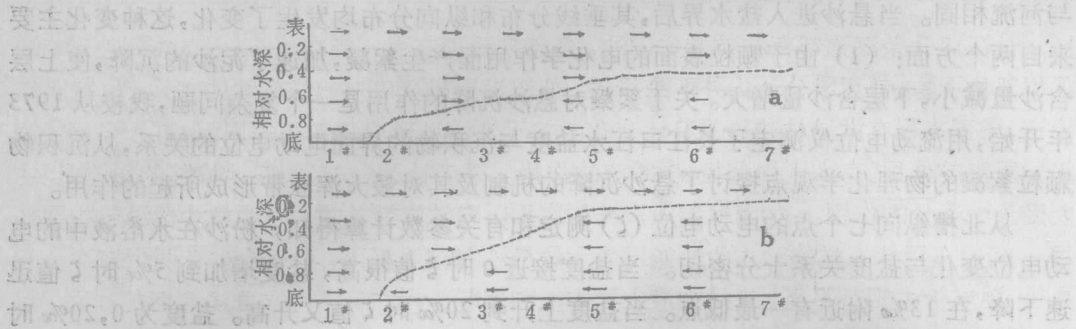


图8 南槽纵向优势沙及优势流分布图

a. 优势流; b. 优势沙。

0.4m层。在0.4m层上下,净流程与净输沙的方向相反,这种现象往往发生在滞流点下游测站的上层,且都是净流程向海而净输沙向陆。图8根据1963年7月资料绘制的南槽纵向优势流和优势沙分布图,两相比较也存在类似情况。显然,上述差别与该区域的涨潮流作用强度有关,当涨潮流速增大到一定量值后,能使底部泥沙掀动而重新悬浮,并通过水流的垂向混合挟带至上层,使上层的涨潮含沙量也大于落潮含沙量,从而产生水流净出而泥沙净进的特殊现象。

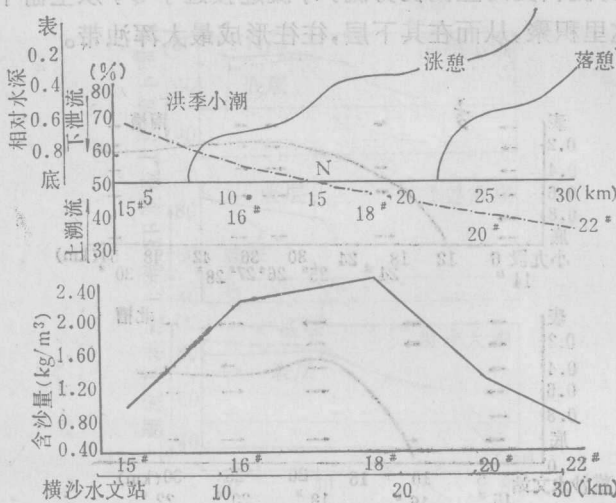


图9 北槽盐水楔锋面、底层优势流、含沙量纵向分布示意图

长江口的最大浑浊带在几条汉道中都存在,其纵向延伸距离约25—40km,含沙浓度表层变化于0.1—0.7kg/m<sup>3</sup>之间,底层变化为1—8kg/m<sup>3</sup>,当其核心部分的近底层含沙浓度很高时,往往出现一种密度大、粘度高的可塑性浑水流体——浮泥。它对入海航道水深的维护是个严重威胁,一条疏浚过的航槽,一、二天内就可被浮泥淤没,淤积厚度可达1.0—1.2m。最大浑浊带存在复杂的时空变化,然而其变化规律与河口环流的变化规律颇为一致,它的分布位置与盐水楔、滞流点的位置非常吻合(图9),这表明河口环流是最大浑浊带和浮泥形成的重要动力条件。应予指出,风浪在浮泥形成与消散中也起重要作用,但限于篇幅在此暂不详细讨论。

长江口几条汉道都存在航道拦门沙,多年来滩顶高程一般在 $-5\sim-7\text{m}$ 间波动,就沉积部位而言,都可以分为内外两个浅滩,外浅滩是长江口航道拦门沙的主体,位置比较稳定,滩顶高程有洪淤枯冲的季节性变化。关于外浅滩形成与变化的原因,有人强调盐淡水异重流的作用,有人则强调径流、潮流的作用。笔者认为,它受到底沙推移的影响,但主要受悬沙落淤的作用。如南槽铜沙浅滩的底质以粉沙淤泥为主,表明悬沙落淤起主要作用。问题在于什么样的动力条件能促使大量悬沙在这里沉降,看来至少有两个方面:一是径、潮流势力相对平衡;二是盐淡水异重流和絮凝作用。这两个方面各有各的作用,但径、潮流势力相对平衡是基础,盐淡水异重流的作用则是依附于这个基础之上的迭加因素。至于滩顶高程的季节变化,其原因除上游来水、来沙年内分配不均匀外,受河口环流制约的最大浑浊带的变化是问题的症结所在。洪季,滞流点的位置正好在滩顶附近,上游来沙丰富,最大浑浊带的含沙浓度特别高,这是洪淤的重要原因。枯季,潮流作用增强,滞流点的位置上移,上游来沙也较少,最大浑浊带发育不佳,滩顶地区在潮流作用控制下呈现冲刷状态。可见,长江口航道拦门沙的形成与变化,河口环流起了重要作用。值得注意的是,对于径、潮流力量都很强的长江口,盐淡水异重流在河口环流形成中所起的作用是属于第二位的,起主导作用的是径、潮流力量的对比。

## 结 语

长江河口水丰沙富,潮量可观。水量沙量有明显的季节变化,潮量有大小潮变化,四条汉道的几何形态不尽相同。因而,混合与环流显得十分复杂。

混合类型随洪枯季、大小潮而变,又因地点而异。北支以C型为主,南支三条汉道以B型为主,有时也能出现C型和A型。混合强度南槽大于北槽,北槽大于北港。

北港、北槽和南槽在径流、潮流、盐淡水异重流共同作用下,都存在上层水流净向海输送,下层水流在滞流点下游净向陆的河口环流现象。下泄流层北港最厚,南槽最薄,北槽居中。滞流点随洪枯季、大小潮作上下迁移,其位置北港最外,南槽最里,北槽居中。这些特点与目前径流量分配北港 $>$ 北槽 $>$ 南槽有关。径流与潮流在长江河口环流形成中起重要作用,盐淡水异重流是在这个基础之上的迭加因素。

悬沙输移模式与河口环流模式相似。最大浑浊带、浮泥、航道拦门沙的位置与变化规律与滞流点相一致,其形成和变化与河口环流密切关联。

## 参 考 文 献

- [1] 沈焕庭,郭成涛,朱慧芳等,1985.长江河口最大浑浊带的变化规律及其成因探讨.海岸河口区动力、地貌、沉积过程论文集.科学出版社,76—89页。
- [2] 黄胜,韩乃斌,钟秀娟,1980.长江口拦门沙淤积分析.河流泥沙国际学术讨论会论文集.光华出版社,447—456页。
- [3] Cameron, W. M. and D. W. Pritchard, 1963. Estuaries. In: The Sea (ed. M. N. Hill). John Wiley and Sons Inc. Publishers, New York, Vol. 2, pp. 306—324.
- [4] Dyer, K. R., 1973. Estuaries: A Physical Introduction. John Wiley and Sons Inc. Publishers, London, pp. 140.
- [5] Hansen, D. V. and M. Jr. Rattray, 1966. New dimensions in estuary classification. *Limnol. Oceanog.* 11: 319—326.
- [6] Pritchard, D. W., 1955. Estuarine circulation patterns. *Proc. Amer. Soc. Civil Eng.* 81: 717.