

椒江河口高混浊水混合过程分析*

董礼先

(国家海洋局第二海洋研究所 杭州 310012)

提要 根据1991年洪季的实测资料分析了高度浑浊的椒江河口的混合过程,并探讨了水动力学和沉积动力学因素对河口混合的重要作用。调查研究表明,椒江河口最大浑浊带下的高浑浊水-浮泥层厚达1m,高浑浊水-浮泥层与上覆水之间是泥跃层。泥跃层与高混浊水-浮泥层对水体稳定的作用比同期观测到的盐跃层大17倍以上。当高浑浊水-浮泥层被侵蚀时,在高浑浊水-浮泥层中的低盐水体又增加了水体的垂向混合能力。

关键词 高混浊水 河口混合 椒江河口

学科分类号 P731

泥跃层和温盐跃层一样,也是一种密度跃层,对其上、下两侧的紊流交换有抑制作用。但目前有关泥跃层及河口高浑浊水对紊流和水体混合的抑制作用的研究还局限在实验室内(Turner,1986; Christodoulou, 1986; Wolanski *et al*, 1989)。本文首次利用实测资料分析了椒江天然的高浑浊河口的混合过程,并探讨了细颗粒泥沙沉积动力学在高浑浊河口混合过程中的作用。

1 外业调查方法

椒江位于浙江中部沿海,汇水面积6750km²,多年平均径流量116m³/s,为浙江第三大水系。河口段位于C1站至椒江市之间长约14km,最宽处约1.8km,水深一般在2—3m。椒江市以外为呈喇叭状向海开放的台州湾,纵长18km(图1)。

外业调查在1991年4月12—22日间进行。小潮期间进行了C1站的连续14h和C2站周日的观测;大潮期间进行了C2站和C3站的周日连续观测(图1)。在大、小潮高平憩流前后各进行了一次J1(与C1站位相同)—J12的纵剖面 and 椒江市断面的横剖面的大面观测。观测项目为温、盐、水深、悬浮泥沙浓度、絮团大小和沉速及连续站点上的流速和流向。深度测量使用钢丝绳和浮泥探针(Mudprobe)上的压力探头相互校正。除使用浮泥探针进行垂向盐度和悬浮泥沙浓度连续观测外,还在表层和水深的0.2,0.4,0.6,0.8倍处及离底1,0.65,0.35m共8个不同层次采集水样,分别使用感应式盐度计和微孔滤膜过滤技术在现场实验室内进行盐度和悬浮泥沙浓度测量,以相互对比和校正。流速和流向的观测使用直读式海流计和一个组合式底层海流计,后者由一个小三角型不锈钢测流架和固

* 国家自然科学基金资助项目,49276274号;浙江省自然科学基金资助项目,490013号;国家海洋局二所-澳大利
亚海洋研究院高浑浊水动力学合作研究项目。董礼先,男,出生于1948年12月,副研究员, Fax: 0086-0571-8054213

收稿日期:1996-04-22,收修改稿日期:1998-01-06

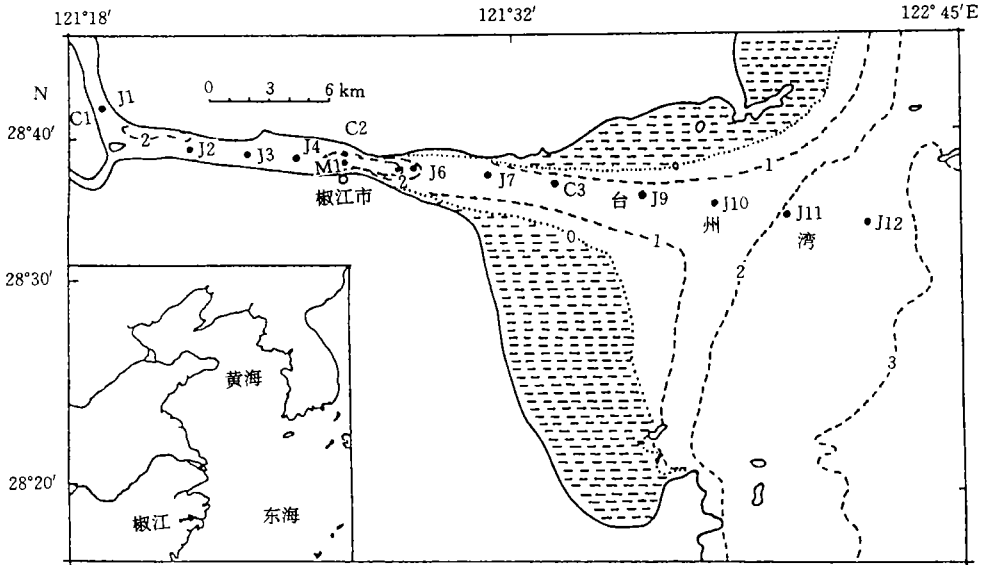


图1 椒江河口地形和站位分布图

Fig.1 Topography and locations of Jiaojiang River Estuary

● 调查站位; --等深线; ...0m等深线

定在其不同高度上(离底 0.15, 0.35, 0.65 和 1.00m)的 4 个直径 12cm 的旋桨式海流计探头组成。不锈钢测流架高 1.2m, 且有一个尾舵, 以保证固定海流计探头的圆柱(直径约 2.5cm)永远对着来流方向。测流时海流计探头在来流方向离测流架最近水平距离为 15cm 左右。此外, 自 4 月 12—22 日在 M1 站使用锚系进行了水深、流速、流向、温度、悬浮泥沙浓度、底床冲淤的定点观测。

2 观测结果

2.1 盐度锋面和盐水楔

大潮期间河口盐度分布较为均匀, 涨潮期间盐度在垂向上几乎完全均匀分布。但河口纵向盐度局部梯度较大, 有较强盐度锋面出现(图 2a)。锋面位于 C1 站下游 16—22km 处, 沿河口轴线方向的跨度约为 5km, 平均每公里盐度变化 2 以上。根据 C1, C2 两个连续站的资料推算, 锋面的内缘可随涨潮水体上溯到 C2 站上游约 2km 的地方, 而随着落潮流退到 C3 站下游 7—8km 处。

小潮期间高潮位的盐度纵剖面分布显示, 盐度由 3 至 22 的水体展布于 20km 左右的范围内, 纵向盐度梯度约为大潮期间的一半。而大潮期间较为均匀的水体此时变得明显层化, 有盐水楔出现。高平前后, 盐水楔的顶端在 C1 站下游 7km 附近。盐水楔与上覆低盐水之间的盐度梯度在 C2 站处可达 7—8/m 左右, 在 C3 站附近也仍可维持 3—4/m 之间(图 2b)。C2 站的观测显示盐水楔在高平前 2h 左右到达 C2, 高平憩流时的厚度为 2.4m, 与上覆水之间的盐度梯度可达到 8/m 左右。高平 3h 后, 盐水楔退出 C2 站, 在该站共持续了 5h 占该站盐度大于 1 的 7h 的 70% 以上。

2.2 盐度的倒置现象

在 C2, C3 站使用两种观测方法(浮泥探针上的 CTD 的连续观测和取水样后用感应式

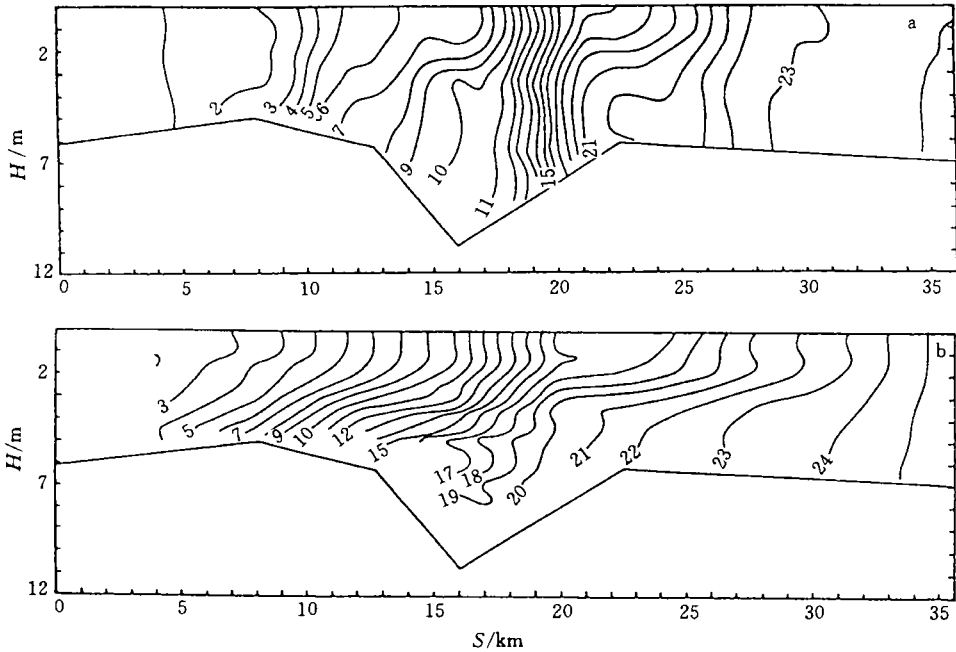


图2 椒江河口高平附近盐度纵向剖面图

Fig.2 Salinity longitudinal distribution in Jiaojiang River Estuary at high water

a. 大潮; b. 小潮

H为离底高度(m); S为离C1站距离(km)(图4同)

盐度计测量)的观测结果均说明椒江河口存在垂向盐度倒置分布现象。主要表现为底部高混浊水-浮泥层内盐度由上向下递减和整个高混浊水-浮泥层的盐度低于其上覆水内的盐度(图3)。盐度倒置现象多出现在高平转流前后。最典型的倒置现象出现在C2站小潮高平前后的1.5h内,其时底层盐度为13.5,而离底1.4m的盐度却达到15.6。Kineke等(1995)曾在Amazon陆架上的浮泥层中也观测到同样的盐度倒置现象,但在河口区尚未见报道。

这种盐度倒置现象与椒江河口高浓度的悬浮泥沙的沉积过程关系密切。在高平转流前,随着涨潮流的减弱,河口水体中大量悬浮泥沙以大颗粒的絮团形式快速落淤,形成了近底层的高混浊水-浮泥层。这些大颗粒的悬浮泥沙絮团的含水量高达80%—90%。絮团在落淤时也把落淤过程中周围水体的盐度特性带进了高混浊水-浮泥层中。由于潮流在涨急以后椒江河口的纵向盐度梯度较大,先落淤的泥沙絮团位于高混浊水-浮泥层的下层,盐度较低;而后落淤的泥沙絮团位于高混浊水-浮泥层的上层,盐度较高。从而形成了高混浊水-浮泥层中的盐度倒置现象。其次,泥跃层对其上、下两侧的流动的分层作用也是形成近底层盐度倒置现象的重要原因。椒江河口的高混浊水-浮泥层与上覆水之间的泥跃层对其两侧混和的抑制作用屏蔽了整个高混浊水-浮泥层。当泥跃层上方的涨潮流速大于其下方时,泥跃层上方随涨潮流上溯的高盐水可以使得泥跃层上方的盐度高于其下方的高混浊水-浮泥层中的盐度,造成河口水体盐度倒置。C2站小潮的近底层潮流观测显示离底0.15m的涨憩时刻超前离底1.0m处近半小时。当底层憩流时,近底层盐度保持在

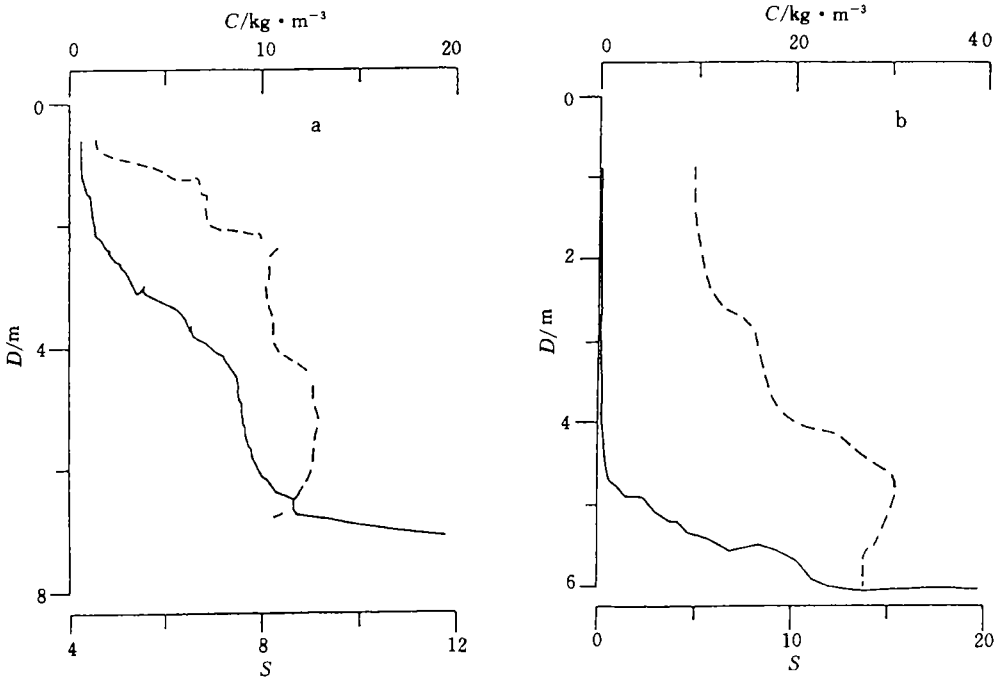


图3 C2站悬浮泥沙浓度(C)和盐度(S)垂向剖面图

Fig.3 Vertical profiles of suspended sediment concentration (C) and salinity (S) at station C2

a. 大潮; b. 小潮

—— 悬浮泥沙浓度(kg/m); ---- 盐度

13.5左右。此时,其上覆水体仍挟带着下游的高盐水向上游运动。由于此时盐度水平梯度很大,很短的时间内离底1.4m层的盐度就达到15.6左右,由此造成高混浊水-浮泥层上覆水中的盐度高于整个高混浊水-浮泥层中的盐度。

2.3 悬浮泥沙浓度分布和泥跃层

椒江河口悬浮泥沙中值粒径为6—8mm,悬浮泥沙中的细粉沙占60%左右,粘土占35%左右,絮团尺寸可达800mm,含水量高达90%以上。絮凝和受阻两种沉降之间的过渡区的悬浮泥沙浓度为2—4kg/m³左右,最大沉速为0.008m/s(Yan *et al*, 1993; Dong *et*

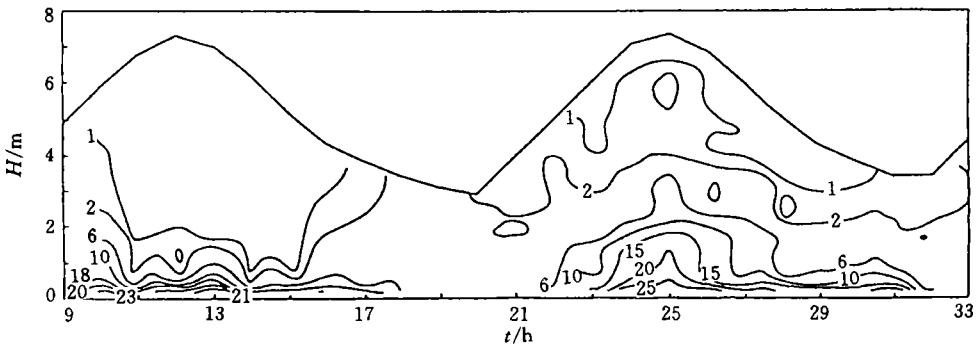


图4 C2站小潮期间悬浮泥沙浓度(kg/m³)

Fig.4 Variation of suspended sediment concentration (kg/m³) in station C2 during the neap

al., 1996)。河口区表层含沙量小于 $1\text{kg}/\text{m}^3$, 近底层是高浑浊水-浮泥层, 含沙量大于 $40\text{kg}/\text{m}^3$ (图 4)。

由于椒江河口细颗粒悬浮泥沙的这些特性, 当流速小于 $0.3\text{m}/\text{s}$ 时, 上层水体中的大量悬浮泥沙由于絮凝沉降而快速落淤, 沉速越向下越大。而底层高浑浊水-浮泥层中的泥沙因受阻沉降而沉速较小, 使得上层水体中沉降的泥沙不能很快抵达底床, 从而在高浑浊水-浮泥层与上覆水之间形成了一个悬沙梯度较大的泥跃层。椒江河口泥跃层最大梯度为深度增加 0.1m 悬浮泥沙浓度增加 $17.5\text{kg}/\text{m}^3$, 位于近底层的高浑浊水-浮泥层与其上覆水之间。除了这个泥跃层之外, 在悬沙浓度为 $2\text{—}3\text{kg}/\text{m}^3$ 处还有一个泥跃层, 但悬沙浓度梯度较小。

3 讨论

3.1 河口水动力的混合作用

椒江河口大潮观测期间最大潮差在 5.3m 以上。由于河口区水深只有 $2\text{—}3\text{m}$, 潮波在进入河口区产生的浅水变形使得涨潮历时与落潮历时的比值大约在 $7.3:5.1$ 左右。按水深 6m 估算, 潮波前缘的半波长在 140km 左右, 水面梯度较大。而河口区的潮波具有显著的驻波特性, 潮波前缘到达时是涨潮流, 波峰过后是落潮流。大潮涨潮时河口区由下游向上游倾斜的水面坡度较大。涨潮期间向河口上游倾斜的水位梯度和外高、内低的水体密度梯度相重合。在两种梯度力的共同驱动下, 最大涨潮流大于 $2\text{m}/\text{s}$ 。水体垂向混合得较为均匀, 外海高盐水齐头并进地向河口上游进逼。由河口上游进入的淡水无法从外海高盐水体上层夺路下泄, 只好向上游退却。从而在淡水和高盐水之间形成了一个较强的盐度锋面。虽然落潮过程中河口有轻度层化的迹象, 但由于大潮期间潮流涡动较强, 水体层化极为轻微。C2 和 C3 站的观测资料均说明落潮过程中的锋面强度比涨潮过程中有所减弱, 但盐度锋面依然存在。

小潮观测期间最小潮差不足 2.4m , 约为大潮潮差的一半。涨潮时外高内低的水位梯度也约为大潮时的一半, 潮流也比大潮时小许多 (约减少 $1/4$), 水体垂向混合能力大为降低。在此情况下, 进入河口内的密度较小的淡水即使在涨潮情况下, 仍在水体上层保持较大优势。比重较大的外海高盐水只能沿下层入侵, 形成了表层向海底层向陆的河口重力环流。很显然, 这种重力环流造成的盐度输运又有于水体的层化。

3.2 细颗粒悬浮泥沙沉积动力学过程的混合作用

椒江河口沉积动力学过程主要通过高悬浮泥沙浓度和细颗粒泥沙的悬浮行为 (泥跃层和高混浊水-浮泥层) 影响河口的混合过程。根据包含盐度和悬沙泥沙的河口水体的状态方程估算, 上述椒江河口最强盛的泥跃层与一个强度为深度增加 0.1m 、盐度增加 13.5 的盐跃层造成的垂向密度梯度是相差无几的。在垂向流速分布相同的情况下, 最强盛的泥跃层处的 Richardson 数比此次观测到的最强盐跃层 ($8/\text{m}$) 的大 17 倍。此外, 在高混浊水体的垂向混合能力不但受控于泥跃层两侧水体密度梯度产生的浮力效应, 同时也受控于高混浊水体中的悬浮泥沙的沉速及高混浊水体本身的粘性对紊流的抑制作用。泥跃层对紊流的抑制作用比一个具有相同 Richardson 数的温盐跃层大得多 (Wolanski *et al.*, 1989)。因此, 椒江河口最强盛的泥跃层对水体垂向混和的抑制作用比同期观测到的盐跃层大 17 倍以上。在小潮期间, 椒江河口中 90% 的时间有高浑浊水浮泥层及泥跃层出现。

虽然按上游输入的淡水和下游输入的进潮量估算,河口应处于良好的混和状态,但河口水体在这些细颗粒悬浮泥沙沉积动力过程的影响下,垂向混合能力下降较大,出现高度层化和盐水楔现象。

与小潮的情况不同的是大潮期间的高混浊水-浮泥层只在转流前、后才出现。当转流后的流速大于 30m/s 左右时,高混浊水-浮泥层就被侵蚀和再悬浮到上覆水体中。河口水体在高平转流后的几个小时内最易于层化。而此时正是泥跃层与其下方的高混浊水-浮泥层被侵蚀掉的时间。一旦高混浊水-浮泥层被侵蚀和混合到上覆水中,原来处于倒置状态的盐度分布就增加了水体的垂向混合能力。所以大潮期间高混浊水-浮泥层中的盐度倒置分布有利于河口水体的垂向混和。

4 结语

4.1 椒江河口是高度混浊的强潮、超浅河口,有盐度锋面、盐水楔、垂向盐度倒置分布、高混浊水-浮泥层和泥跃层等丰富的混合现象出现。河口水动力过程和细颗粒悬浮泥沙沉积动力学过程均影响河口混合过程。

4.2 影响河口混合的主要水动力因子除了径流和大小潮变化外主要是潮波变形。椒江河口水深浅,驻波特性明显。大潮涨潮期间水面坡度大,潮流强劲,垂向涡动混合强烈。水体垂向均匀,上游淡水和外海入侵河口的沿岸水之间盐度梯度较大,形成了盐度锋面。

4.3 小潮期间河口近底层有高混浊水-浮泥层和泥跃层发育,水体垂向混合的抑制作用比同期观测到的盐度跃层大 17 倍以上。在这些细颗粒泥沙沉积动力过程的影响下,椒江河口水体高度层化,有盐水楔出现。

4.4 细颗粒悬浮泥沙动力沉积过程造成了高混浊水-浮泥层中的盐度倒置分布。当大潮高平后混浊水-浮泥层被侵蚀和再悬浮时,这种倒置的盐度分布加强了河口的垂向混合。

参 考 文 献

- Christodoulou G C, 1986. Interfacial mixing in stratified flows. *J Hydraul Res*, 23(2):77—92
- Dong Lixian, Wolanski E, Yan Li, 1996. Field and modeling studies of fine sediment dynamics in the extremely turbid Jiaojiang River Estuary, China. *J Coast Res*, 13(4):995—1003
- Kineke B C, Sternberg R W, 1995. Distribution of fluid muds on the Amazon continental shelf. *Marine Geology*, 125:193—233
- Turner J S, 1986. Turbulent entrainment: the development of entrainment assumption, and its application to geophysical flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 173:431—471
- Wolanski E, Aseada T, Imberger J, 1989. Mixing across lutocline. *Limnol and Oceanogr*, 34(5):931—938
- Yan Li, Wolanski E, Xie Qinchun, 1993. Coagulation and settling of suspended sediment in Jiaojiang River estuary, China. *J Coast Res*, 9:390—402

MIXING PROCESS IN HIGHLY TURBID WATERS OF JIAOJIANG RIVER ESTUARY

DONG Li-xian

(*Second Institute of Oceanography, State Ocean Administration, Hangzhou, 310012*)

Abstract The Jiaojiang River Estuary is shallow, macro-tide dominated, highly turbid, and has large freshwater discharge variations. The mixing processes include phenomena such as freshwater front, salt wedge and vertical negative salinity gradient. This paper presents the analyzed result of the mixing processes in Jiaojiang River Estuary and the effects of both hydrodynamics and fine sediment dynamics using a set of observational field data collected in April, 1991.

During spring tidal flood, the water column is vertically homogenous, but has a freshwater front in the estuary. A 1m thick fluid mud layer capped by a lutocline is formed when the tidal current velocity is less 0.3ms^{-1} . The low-salinity water trapped in the fluid mud layer underlying more salty water enhances vertical mixing when the fluid mud layer is eroded.

During the neap, two lutoclines exist in the water column for 80%—90% of observation time in two tidal cycles. The lutocline's contributions to the water column stability are 17 times larger than that of the maximum salinity gradient ever observed throughout our study. The water column is stratified due to the lutoclines and the high suspended sediment concentrations inhibiting the vertical mixing. The freshwater front present in spring tide evolved into a salt wedge.

Key words Highly turbid water Estuarine mixing Jiaojiang River Estuary

Subject classification number P731