

闽江口的盐、淡水混合*

潘定安 沈焕庭

(华东师范大学河口海岸研究所, 上海 200062)

提要 采用盐、淡水混合比的概念研究闽江口的混合状态, 并确定了分层、部分混合、高度混合 3 种类型的分类指标。研究表明, 闽江口主要水道的盐、淡水混合以部分混合为主, 其次是分层, 高度混合出现的机率较少; 盐水异重流发育良好, 混合状态的变化与潮流速的变化不相一致; 盐水入侵时混合比相对较小, 后退时相对较大。闽江口是一个径、潮量比值较小的强潮河口, 按照一般规律, 其盐、淡水混合应该出现高度混合型, 但在闽江口的主河道中发生的却是部分混合型, 产生这种特殊现象的原因与河口分汊、会合、槽深等因素的作用有关。

关键词 闽江口 盐、淡水混合 混合比 混合分类

闽江口是一个地形复杂的强潮河口。亭江下游河口呈三角形, 中间分布着众多岛屿, 有 5 条入海水道(图 1)。川石水道和上游的英屿水道及向外延伸的外川石水道为闽江口的主干水道。盐、淡水混合是河口的一种重要现象。盐、淡水混合的物理化学过程对河口的水文泥沙特性、生态环境、污染物的扩散自净、淡水资源利用、沉积过程和河口的发育演变等均带来一定的影响。

本文针对闽江口的实际情况, 探讨盐、淡水混合的判别, 研究闽江口盐、淡水混合的状态、类型、变化及其产生的原因, 并讨论闽江口地形对盐、淡水混合的作用。由于资料的局限, 研究重点在闽江口的主干水道。

1 盐度分布

闽江口的盐度分布见图 2。洪季(图 2a)等盐度线呈楔形分布, 涨潮时盐水入口门, 高潮时入侵最甚, 一个潮周期口门的盐度变化幅度表层为 8, 底层为 25。枯季(图 2b)等盐度线接近垂直分布, 落潮时淡水只能到达亭江附近, 口门的盐度为 10 左右, 涨潮时盐水到达大屿附近, 口门地区的盐度增加至 27, 一个潮周期中口门的盐度变化幅度为 17 左右。日平均盐度见表 1。洪季盐水从口门上溯 10km 左右, 日平均盐度平均每公里向上游递减 1.3。枯季盐水可达距口门 24km 以上, 日平均盐度平均每公里向上游约递减 1。

闽江口的盐度分布洪、枯季有较大的差异, 主要表现为: 洪季盐水入侵的距离短, 盐度沿程的变率大, 枯季盐水入侵的距离长, 盐度沿程的变率较小; 盐度的垂向变化洪季大、枯季小; 洪季等盐度线呈楔形分布, 口门以外几乎呈水平分布, 枯季等盐度线接近垂直分布; 潮周期中, 洪季盐度的变化幅度较大, 枯季盐度的变化幅度较小。

2 河口盐、淡水混合

* 自选课题。

收稿日期: 1992 年 1 月 9 日, 接受日期: 1992 年 6 月 17 日。

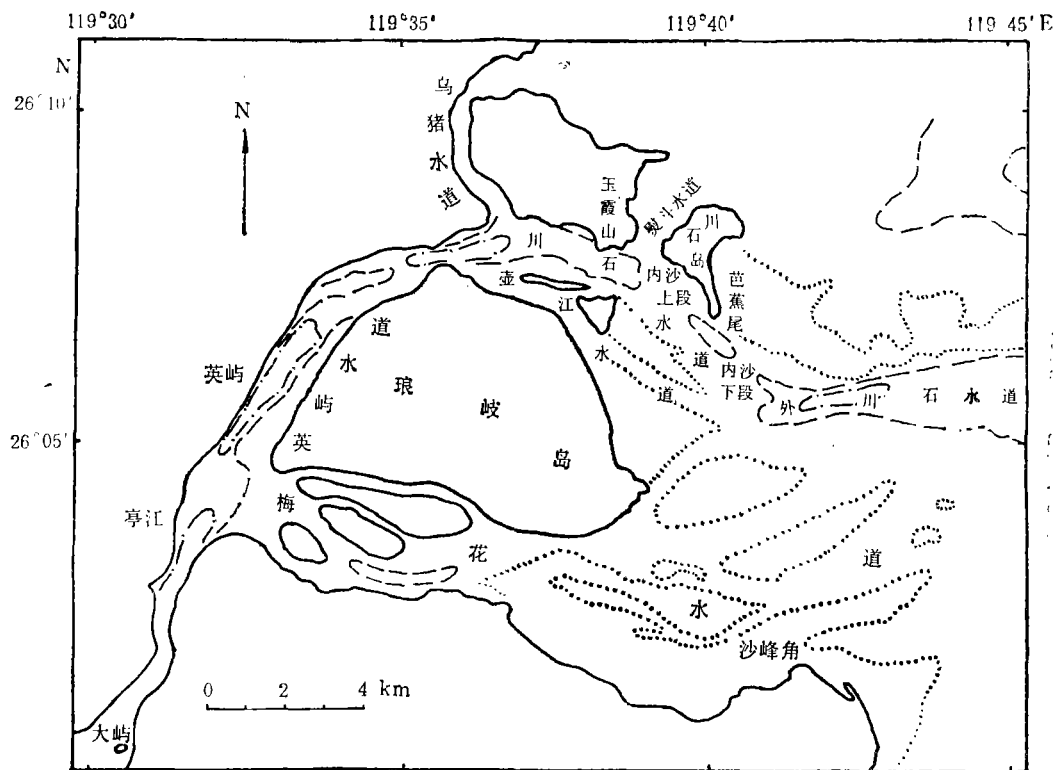


图 1 闽江口形势图

Fig. 1 Map of the Minjiang River estuary

——岸线;0m 等深线; ---5m 等深线; -·-10m 等深线。

表 1 闽江口的日平均盐度

Tab. 1 Daily mean salinity in the Minjiang River estuary

地 点		亭 江	英 屿	乌 猪 口	内沙上段	内沙下段	口外 5km
洪 季 (1986.6. 14—15)	表 层	0.37	0.37	2.49	2.64	5.87	12.78
	底 层	0.38	0.38	7.23	13.31	18.56	28.40
	垂线平均	0.38	0.38	5.14	8.92	13.38	22.04
枯 季 (1986.10. 10—11)	表 层	3.37	5.93	15.52	17.12	21.66	25.87
	底 层	5.04	7.90	18.00	20.41	24.49	27.51
	垂线平均	4.36	7.06	17.12	19.12	23.39	26.87

2.1 混合状态的判别 河口盐、淡水混合常分为弱混合、缓混合和强混合 3 种类型,或者分成高度分层(A)、部分混合(B)、垂直均匀混合(C)和断面均匀混合(D) 4 种类型。前者分类有较好的实用性,后者分类有较强的理论意义。

2.1.1 采用径、潮流量的比值 K 进行判别 (Simmons et al., 1969) $K = (\text{一个潮周期中的河水径流量}) / (\text{涨潮期的进潮量})$, 当 $K \geq 0.7$ 时为高度分层, $0.1 < K < 0.7$ 为部分混合, $K \leq 0.1$ 为强混合。这种判别方法,只要知道径流量和潮流量就能对盐、淡水混合作出判断,但对表征混合过程的某些物理量的讨论有局限性,对复杂的大河口作深入细致

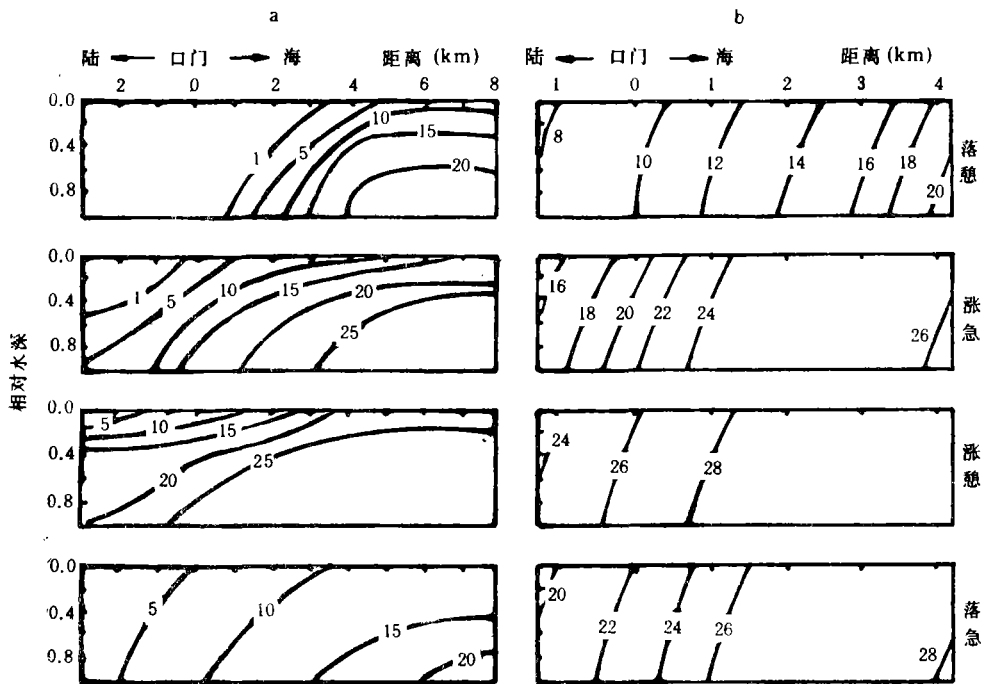


图 2 闽江口主干水道纵断面的盐度分布

Fig. 2 Salinity distribution along the longitudinal section of the main waterway in the Minjiang River estuary

a. 1984.6.6; b. 1986.10.10.

的研究比较困难。

2.1.2 采用分层系数 n 进行判别(Cameron et al., 1963) $n = (\text{底、表层盐度差}) / (\text{垂线平均盐度})$, 当 $n > 10^0$ 时为高度分层或出现盐水楔, n 在 $10^0 - 10^{-2}$ 之间为部分混合, $n < 10^{-2}$ 时为垂直均匀混合。

2.1.3 应用分层-环流图解进行判别(Hansen et al., 1966) 分层-环流图的纵坐标为分层系数, 横坐标为环流系数, 即表层净流速与断面平均淡水流速的比值, 坐标中划分成各个区域, 混合类型视在哪个区域而定。分层-环流图解对混合的分类采用了上述分层系数的指标, 不过分层-环流图解还能区分盐、淡水混合是以平流掺混作用为主, 抑或潮汐扩散为主。

分层系数法或分层-环流图解法由于从水体盐度的分布来区别盐、淡水的混合类型, 对混合状态的描述比较深入具体。但定义的分类指标只能区分出几乎是极端状态的高度分层和垂直均匀混合, 除此以外, 其他都属于部分混合。这在理论上无疑是正确的, 但部分混合的范围过宽, 而且实际中达到垂直均匀混合的河口极为少见。例如, 表层盐度为 21.06, 底层盐度为 21.94, 垂线平均盐度为 21.6, 计算得到的分层系数为 $10^{-1.39}$, 这种情况仍视作部分混合。按这种指标分类, 作为我国强潮河口——钱塘江河口口外海滨的杭州湾, 由于分层系数大部分大于 10^{-2} (胡方西等, 1990), 盐、淡水混合以部分混合为主, 与长江河口(陈吉余等, 1988)同属一个类型。显然, 这与我国普遍认为的钱塘江口杭州湾和长

江口的盐、淡水混合是分别属于两种不同类型的看法有较大距离。

2.1.4 本文提出混合比的概念来描述和判别盐、淡水混合的状态和类型 所谓混合比,指盐、淡水混合过程中,表层水盐度占底层水盐度的百分比。设混合比为 M , 则

$$M = (S_t/S_b) \times 100\%; 0 \leq S_t \leq S_b, S_b > 0$$

式中, S_t 为表层盐度, S_b 为底层盐度, M 越大混合越充分。

混合比接近 0 时,说明表层为淡水,盐、淡水高度分层,出现盐水楔。混合比达到 100% 时,表示垂向上盐度均匀一致,是混合的最终状态。本文采用 3 种盐、淡水混合类型,分别称为分层型、部分混合型和高度混合型,以混合比 0—100% 按四分位点来进行划分。混合比从 0 增加到 100%,是盐、淡水混合状态从分层到部分混合再到高度混合的发展过程,其中 50% 处在部分混合的中心位置。把分层向部分混合过渡的 0—50% 等分成两个区域,则前一个区域,即 0—25% 为分层的范围;后一个区域,即 25%—50% 为部分混合的范围。同样把 50%—100% 等分成两个区域,则 50%—75% 为部分混合的范围;75—100% 为高度混合的范围。因此混合比判别盐、淡水混合类型的指标定义为:

$$\begin{aligned} M < 25\% & \quad \text{分层型(接近 0\% 为高度分层或盐水楔)} \\ M = 25\% - 75\% & \quad \text{部分混合型} \\ M > 75\% & \quad \text{高度混合型(接近 100\% 为垂直均匀混合)} \end{aligned}$$

2.2 闽江口的盐、淡水混合

2.2.1 混合类型 采用混合比分类法得到的闽江口盐、淡水混合类型列于表 2。闽江口盐、淡水混合分层、部分混合和高度混合 3 种类型都能发生。根据径流量与盐、淡水混合之间的关系,经实测资料统计分析,当河口径流控制站的径流量大于 $2500\text{m}^3/\text{s}$ 时,闽江口主干水道的口门附近盐、淡水出现分层;当径流量为 $2500-600\text{m}^3/\text{s}$ 时,出现部分混合;小于 $600\text{m}^3/\text{s}$ 时出现高度混合。再据径流量的年内分配推算混合类型年内出现的机率,分层为 20%;部分混合为 68%;高度混合为 12%。因此闽江口是一个以部分混合为主的河口。

按照分层系数法分类,闽江口盐、淡水混合类型列于表 3。对比表 2 和表 3,可以看出,混合比分类法把分层系数分类法中的部分混合区分出部分混合和高度混合,这对判别盐、淡水混合的类型更具应用意义。

2.2.2 混合状态的潮周期变化 闽江口盐、淡水混合状态在潮周期内有明显的变化(图 3)。在涨潮期,自落憩至涨急混合比由大变小,涨急前后最小,自涨急至涨憩混合比由小变大。在落潮期,初落时混合比有所减小,然后逐渐增加,至落憩前再行减小。

闽江口盐、淡水混合状态与潮流速的变化并不完全同步,在动力条件最强的涨急时期混合比反而最小。这说明混合状态在径流量不变的情况下,除了与潮流的强弱有关外,还受其他因素的影响,甚至有时起着重要的作用。下面的分析表明,盐水异重流是产生这一现象的主要原因。

盐、淡水混合河段的垂线流速分布与淡水河段相比明显变形(图 4),这是盐水异重流作用所致。闽江口盐水异重流发育良好。潮流开始上涨时,潮流与异重流方向一致,盐水从底层上溯,使表、底层的盐度差增加,表现为该时的混合比减小。至涨急时,潮流加上异重流,底层盐水上溯最为迅速,虽然此时水流速度较大,但从底层入侵的盐水远大于下层

表 2 闽江口的盐、淡水混合比(%)及其类型
Tab. 2 Ratio (%) and types of salt and fresh water mixing in the Minjiang River estuary

断面位置	亭江	英 峙	乌猪水道 分叉口	玉霞山	鳌斗水道 分叉口	内沙上段	芭蕉尾	内沙下段	口门外 (2.5km)	口门外 (5km)
洪 季	1984.6.6-7			39(II)		31(II)	31(II)	49(II)	42(II)	49(II)
	1984.6.13-14			10(I)		5(I)	14(I)	22(I)	38(II)	46(II)
	1986.6.14-15	淡水	淡水		67(II)	20(I)		32(II)		45(II)
	1986.6.22-23	淡水	淡水		60(II)	27(II)		45(II)		
枯 季	1986.10.10-11	78(III)	81(III)		94(III)	84(III)		88(III)		94(III)
	1986.10.18-19	76(III)	95(III)		99(III)	89(III)				

注: 数码字为混合比(%); I 为分层, II 为部分混合 III 为高度混合。

表 3 闽江口的盐、淡水混合分层系数及其类型
Tab. 3 Stratification coefficient and types of salt and fresh water mixing in the Minjiang River estuary

断面位置	亭江	英 峙	乌猪水道 分叉口	玉霞山	鳌斗水道 分叉口	内沙上段	芭蕉尾	内沙下段	口门外 (2.5km)	口门外 (5km)
洪 季	1984.6.6-7			$10^{-0.1}$ (B)		$10^{-0.02}$ (B)	$10^{-0.01}$ (B)	$10^{-0.2}$ (B)	$10^{-0.1}$ (B)	$10^{-0.2}$ (B)
	1984.6.13-14			$10^{0.2}$ (A)		$10^{0.2}$ (A)	$10^{0.1}$ (A)	$10^{0.1}$ (A)	$10^{-0.1}$ (B)	$10^{-0.1}$ (B)
	1986.6.14-15	淡水	淡水		$10^{-0.4}$ (B)	$10^{0.1}$ (A)		$10^{-0.02}$ (B)		$10^{-0.2}$ (B)
	1986.6.22-23	淡水	淡水		$10^{-0.3}$ (B)	$10^{-0.01}$ (B)		$10^{-0.2}$ (B)		
枯 季	1986.10.10-11	$10^{-0.4}$ (B)	$10^{-0.6}$ (B)		$10^{-1.3}$ (B)	$10^{-0.8}$ (B)		$10^{-0.2}$ (B)		$10^{-1.2}$ (B)
	1986.10.18-19	$10^{-0.5}$ (B)	$10^{-0.7}$ (B)		$10^{-1.9}$ (B)	$10^{-0.9}$ (B)				

注: 数码字为分层系数; A 为高度分层; B 为部分混合。

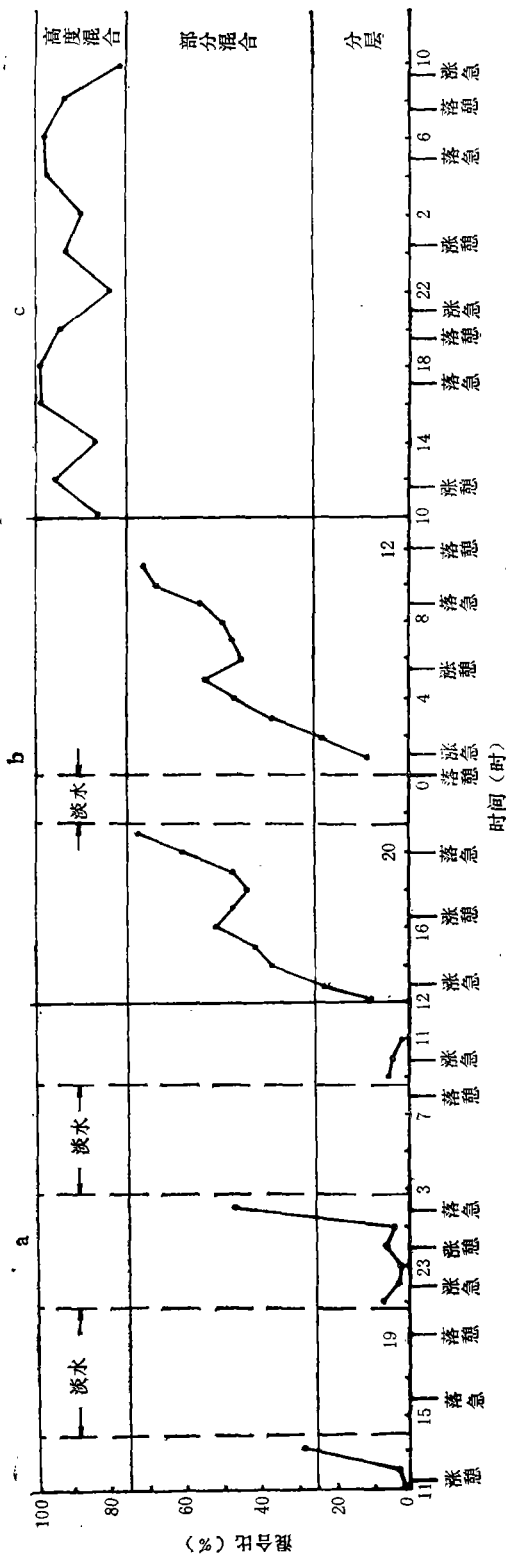


图3 闽江口盐、淡水混合的时间变化
 Fig. 3 Time variation of salt and fresh water mixing in the Minjiang River estuary
 a. 内砂上段(1984.6.13—14); b. 内砂下段(1984.6.6—7); c. 内砂上段(1986.10.18—19)。

掺混进入表层的盐水,使表、底层的盐度差值最大,因此混合比出现最小。涨急以后流速减小,底层盐水入侵逐渐减弱,表、底层的盐度差逐渐减小,混合比逐渐增加。潮水初落时,底层水体由于异重流的作用,下泄速度比上层缓慢,甚至出现表、底层方向相反的交错流,使表、底层盐度差值加大,混合比减小。随着落潮流速的加大,由下层进入表层的盐水增加,混合比逐渐增加。可见,盐水异重流与潮流之间的相互作用是形成闽江口盐、淡水混合状态与潮流强弱变化不完全一致的动力机理。

2.2.3 混合状态在盐水入侵和后退过程中的变化 在潮汐河口,涨潮时盐水入侵,落潮时盐水后退。为了研究盐水在入侵和后退过程中混合的情况,绘制了混合比值图(图5)。纵坐标为 S_t/S_b , 即混合比,表示垂向上的混合状态。横坐标为 S_b/S_0 , 即底层盐度与口外海水盐度的比值,表示纵向上的混合状态,反映盐水入侵的部位,比值越小越近盐水入侵的头部。该图能表明某一测站不同时刻盐水入侵的部位和混合的状态,因此把不同时刻的混合比点入混合比值图中,再根据时间序列连线,便可以看出盐水在入侵或后退过程中混合状态的变化。图5表示闽江口门附近分层、部分混合和高度混合3种类型时的情况,闽

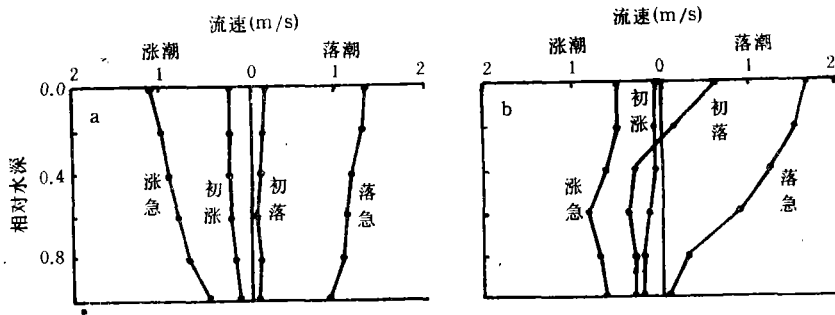


图 4 闽江口流速的垂线分布 (1988.6.14)

Fig. 4 Vertical distribution of current velocity in the Minjiang River estuary (June 14, 1988)

a. 淡水河段(英屿); b. 盐、淡水混合河段(内沙上段).

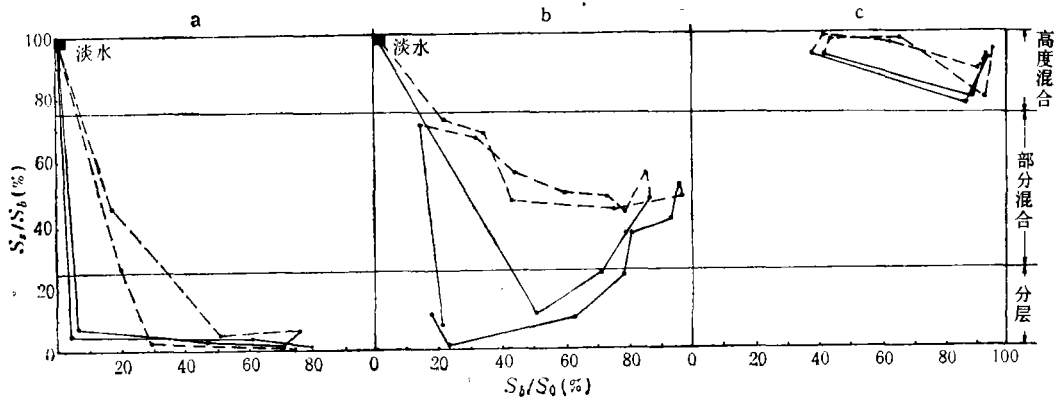


图 5 闽江口门附近的混合比值图

Fig. 5 Mixing ratio in the area adjacent to the mouth of the Minjiang River

a. 内沙上段(1984.6.13—14); b. 内沙下段(1986.6.6—7); c. 内沙上段(1986.10.18—19).

——盐水入侵过程; ----盐水后退过程。

江口海水盐度取 30。

图 5a 中的点子主要分布在分层区,盐、淡水混合的总趋势为分层状态。盐水在入侵过程中,头部迅速进入分层状态,并保持至入侵后期,变化幅度较小。后退过程中,混合比不断增加,退至盐水的头部出现部分混合状态。图 5b 中大多数点子落在部分混合区,盐、淡水混合的总趋势为部分混合。在盐水入侵过程中,前期混合比较小,处于分层状态,直至后期才进入部分混合状态。后退过程中,后退的前期和中期保持部分混合状态,但混合比有增加的趋势,退至盐水头部混合比最大。图 5c 中所有的点子都分布在高度混合区,盐、淡水混合为高度混合型。枯季盐水入侵距离长,口门附近盐水的进退只能经历盐水入侵的中部和后部,混合比相对而言中部比后部大。

3 种混合类型有共同的趋势性规律: 盐水入侵过程中,混合比先是减小然后增加,后退过程中,混合比一直增加;盐水入侵时,混合比相对较小,盐水后退时,混合比相对较大。其形成机制与潮流的变化和异重流的作用有关。

3 地形对盐、淡水混合的影响

闽江口门的平均潮差达 4.46m。强潮河口盐、淡水的混合状态常出现高度混合型,如我国的钱塘江、甌江等河口。从径流量和潮量的相对大小来看,闽江口从芭蕉尾—沙峰角口门、熨斗水道分汉口和乌猪水道分汉口进入的潮量约 8.6 亿 m^3 , 闽江口的年径流量为 600 亿 m^3 , 若用一个潮周期中的河水径流量与涨潮期进潮量的比值来判别盐、淡水混合类型,其比值小于 0.1,则闽江口的盐、淡水混合应该属于强混合型。可是在闽江口的主干水道中实际出现的盐、淡水混合却以部分混合为主,其次是分层,而高度混合所占的比例甚少,这种现象的发生应该归因于地形的作用。

3.1 闽江口的地形特征

3.1.1 由于地质构造的控制,梅花、乌猪、熨斗 3 条汉道与主汉之间成直角或钝角相交。

3.1.2 主干水道的江面较狭河槽较深,宽、深比相对较小,其他水道呈喇叭状,河槽宽、浅和宽、深比相对较大。

3.1.3 主干水道口门外有深槽发育,一般水深为 7—8m。该深槽在形态上直接与闽江口主干水道相连。

3.1.4 川石水道与梅花水道在口门会合,因此从川石水道和梅花水道下泄的水流过琅岐岛后合流向东。

3.2 地形对盐、淡水混合的影响

3.2.1 闽江的径流主要通过川石水道下泄 在地形作用下,各汉道中的水量输送出现较大的差别,根据 1986 年实测资料反映,熨斗、壶江两水道向陆输送,梅花、乌猪和川石 3 条水道向海输送,但梅花和乌猪的量值较小。闽江口的径流量约 85% 通过川石水道下泄,川石水道中的径流作用特强。

3.2.2 川石水道口外的径流作用保持长距离强盛不衰 川石水道和梅花水道在口门相会,在合流过程中,梅花水道的水流抑制川石水流向南横向扩散,流束相对集中。同时梅花水道的部分水量汇入川石水流,增加水流的能量。因此川石水道口门外的径流作用保持长距离强盛不衰。

3.2.3 涨潮分流及会合使川石水道口门的进潮量减小 外海的西向涨潮流在接近口门的过程中,由于水位北高南低(潘定安等,1991),部分水流逐渐向南偏转进入梅花水道。同时从外川石水道上溯的涨潮流分成梅花、壶江和川石 3 支进入闽江。另外熨斗水道和川石水道的会潮点在分汉口下游的川石水道中(潘定安等,1991),熨斗水道与川石水道又成钝角相交,从川石水道上溯的涨潮流受到熨斗水道涨潮流的会合顶冲,影响川石水道的进潮量。因此从川石水道口门进入的潮量较少。

3.2.4 主干水道河槽较深不利盐、淡水充分混合 盐、淡水混合有掺混和湍流扩散两种形式,在潮汐较强的河口,往往由底摩擦而产生的湍流混合比由盐、淡水层之间流速切变产生的掺混要强烈得多,当湍流足以搅拌整个水体时,出现高度混合状态。但是水深越大这种可能性就越小。闽江口主干水道河槽较深,不利盐、淡水充分混合。

由于上述原因,闽江口虽属强潮河口,但在主干水道中很少出现高度混合状态。相反,在洪水季节,盐水被推至口门附近,落潮时淡水越过拦门沙进入口外深槽,浮托在盐水之上向外扩散,涨潮时异重流与潮流方向一致,盐水顺势从口外深槽下层向河口入侵,盐、

淡水混合出现分层型。

4 结论

4.1 闽江河口的主干水道盐、淡水混合以部分混合为主,其次是分层,而高度混合出现的机率甚小,因此闽江口是以部分混合为主的河口。

4.2 闽江口盐、淡水混合状态的变化,除受控于径、潮流的作用外,还受到盐水异重流的重要影响。在异重流的作用下,盐、淡水混合状态的变化与潮流的变化不相一致。

4.3 闽江口盐、淡水混合状态落潮时比涨潮时充分。

4.4 闽江口为强潮河口,按照一般规律盐、淡水混合应为高度混合型,但由于地形的作用,使闽江口的盐、淡水混合有别于其他强潮河口。可见,在研究河口盐、淡水混合时应该重视地形的作用,对于复杂的分汊河口更应如此。

4.5 本文提出的混合比和分类法能够较好地对盐-淡水混合进行描述和分类,具有较强的实用意义。

参 考 文 献

- 陈吉余等, 1988, 长江河口动力过程和地貌演变, 上海科学技术出版社, 122—124, 138—144, 162—165。
胡方西等, 1990, 杭州湾盐度变化的基本特征, 海岸河口研究, 海洋出版社(北京), 76—94。
潘定安等, 1991, 闽江口川石水道的水文泥沙特性及其内拦门沙成因分析, 华东师范大学学报(自然科学版), 1: 87—96。
Cameron, W. M. and Pritchard, D. W., 1963, Estuaries in the Sea, ed by Hill, M. N., Vol. 2, John Wiley & Sons (New York), pp. 306—324。
Hansen, D. V. and Rattray, M., 1966, New dimensions in estuary classification, *Limnol. Oceanogr.*, 11: 319—326。
Simmons, H. B., Brown, F. R., 1969, Salinity Effects on Estuarine Hydraulics and Sedimentation, Proc. 13th Congress of IAHR., Vol. 3, pp. 311—325。

THE MIXING OF SALT AND FRESH WATER IN THE MINJIANG RIVER ESTUARY

Pan Dingan, Shen Huanting

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

ABSTRACT

The authors of the paper studied the salt and fresh water mixing in the Minjiang River estuary using the concept of mixing ratio. The mixing ratio is the percent of salinity at surface over that of the bottom. Let the mixing ratio be M , Then $M = (S_s/S_b) \times 100\%$, where S_s = surface salinity, S_b = salinity at bottom. The bigger M is, the stronger the mixing is. The mixing is of stratified type when $M < 25\%$, partially mixed type when $M = 25\% - 75\%$, and highly mixed type when $M > 75\%$.

The type of salt and fresh water mixing in the major channels of the Minjiang River estuary is mainly of the partially mixed type, and sometimes stratified type. The possibility of being highly mixed type displays rare.

The variation of the mixed degree and tidal current velocity is not consistent under the action of density current. The mixing strength is relatively weak as salt water intrudes upstream along the bottom. Otherwise, it is strong.

In general, the salt and fresh water mixing in the Minjiang River estuary should be of highly mixed type because of the strong tidal action, but the major bifurcated channels of the Minjiang River estuary are of the partially mixed type. This is related to factors such as the estuarine branching, junction and channel depth.

Key words Minjiang River estuary Salt and fresh water mixing Mixing ratio Mixing classification