# 象山港盐度分布和水体混合<sup>\*</sup> I. 混合分析

# 董礼先 苏纪兰

(国家海洋局海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室 国家海洋局第二海洋研究所 杭州 310012)

提要 利用 1981—1990 年象山港的实测水文断面资料和盐度通量分析方法定量检验了各种 动力因子对象山港水体混合的贡献,探讨了象山港水体混合的控制机理。象山港牛鼻水道至佛 渡水道为平流和潮弥散混合区,水体纵向混合较好。象山港狭湾内段的潮混合强度较弱,垂向 环流和潮振荡的垂向切变作用突出,水体纵向混合较狭湾外差。象山港狭湾外段为内段与口外 的过渡区,各种混合因子的地位随季节和潮汛而变,水体混合状况介于狭湾内段和口外之间。

关键词 水体混合 通量分析 象山港

学科分类号 P731

河口和海湾的水体混合问题是所有海洋学科都关心的水动力问题之一。盐度通量分 析方法因其可以定量检验各种动力因子对混合的贡献而在最近几十年中被大量应用 (Fischer, 1972; Dyer, 1974; 王康墡等, 1987)。为量化象山港各种动力因子对混合的贡献, 并为象山港水交换数值模式提供依据和基本参数,本文利用 1981—1990 年的实测水文断 面资料进行了盐度通量分析<sup>11</sup>,定量检验了潮弥散、重力环流和潮振荡剪切等各种混合因 子对象山港水体混合的贡献,并初步探讨了象山港不同区域的混合控制机理。

### 1 资料收集和分析方法

本文收集研究了象山港水交换专题调查 1990 年 6 月和 12 月在 A1-A2 断面和 A3-A5 断面进行的连续周日水文同步调查及 Z1-Z4 站的逐时水位测量资料<sup>1)</sup>。此外,收集了 1981 年 8 月 B1-B4 断面和 1983 年 12 月 A10-A12, A6-A8(与 B1-B4 为同一断面)两条断面的 大、小潮期间的连续周日同步水文断面观测资料和 Z5、Z6 站的同期水位资料<sup>1)</sup>(图略,见董 礼先等,2000)。

使用王康墡等(1987)提出的盐度通量分析方法定量检验潮、环流和潮振荡剪切等各 种水动力因子对水体混合的贡献和控制作用。按该模式,潮均盐通量 F 可表示为,

 $F = \overline{a} \ \overline{u_a} \ \overline{s_a} + \overline{s_a} \ \overline{AU_a} + \overline{u_a} \ AS_a + \overline{aU_aS_a} + \overline{AU_aS_a} + \overline{a(\bar{u}_r\bar{s}_r)_a} + \overline{a(\bar{u}_r\bar{s}_r)_a} + \overline{a(U_rS_r)_a} + \overline{a($ 

\* 国家自然科学基金资助项目,48907026号.董礼先,男,出生于1948年12月,研究员,E-mail:lxdong@ust.hk
1) 浙江省海岛资源调查资料及浙江省海岸带资源调查资料
收稿日期:1996-08-26,收修改稿日期:1998-09-16

式中,"一"表示潮平均(本文采用 2 个潮周期平均); a 表示断面面积的瞬时值; A 表示相对 于断面潮平均面积的潮起伏值; 下标 a 表示断面平均; 下标 v 和 t 分别表示与垂、横向有关 的量; T1 表示平均流动引起的输运; T2 是潮位与潮流相关项, 即斯托克斯漂移(Stokes draft)效应引起的输运; T3 为断面积与物质的潮变动关系项; T4 为物质与流的潮变动关 系项; T5 为断面面积、流与物质的三阶相互关系项; T6 和 T7 分别为横、垂向环流的贡献; T8 和 T9 分别为横、垂向潮振荡的切变作用; T10 一T13 是环流和振荡潮切变的相互关系 项。

## 2 结果与讨论

#### 2.1 盐度通量分析计算结果

方程(1)中各项在各断面的计算结果如表 1 所示。根据通量各项的物理含义,平流的 输运作用体现在 T1 和 T2 中。弥散作用主要包含在 T3-T13 项中,其中 T3-T5 为潮弥散 的贡献,T6、T8、T10 和 T12 为横向环流和潮振荡的横向切变作用的贡献;T7、T9、T11 和 T13 为垂向环流和潮振荡的垂向切变作用的贡献。

为便于各断面间的比较,根据各项的物理含义计算断面的弥散系数 D,并把弥散系数 分解为潮弥散系数 D1,重力环流和垂向潮振荡切变的综合作用弥散系数 D2 及横向环流和 横向潮振荡切变的综合作用弥散系数 D3 三部分。根据盐度守恒原理和通量的分解公式

(1)有: 
$$D = D1 + D2 + D3$$
, 其中,  $D1 = -(T3 + T4 + T5) / (\bar{a}\frac{\partial \bar{s}_a}{\partial x}); D2 = -(T6 + T8)$ 

+ *T*10) /  $\left(\bar{a}\frac{\partial \bar{s}_a}{\partial x}\right)$ ;*D*3 = - (*T*7 + *T*9 + *T*11) /  $\left(\bar{a}\frac{\partial \bar{s}_a}{\partial x}\right)$ ;  $\bar{s}_a$ 为盐度的断面潮均值; *x*为主槽

Tab.1	Percentage of each ter	m of equation	(1) compared wit	h the salinity flu	(F) for each c	ross-section
	A3-A5	B1-B4	A6-A8	A6-A8	A10-A12	A10-A12
断面	1990-06	1981-08	1983-12	1983-12	1983-12	1983-12
	(大潮)	(大潮)	(大潮)	(小潮)	(大潮)	(小潮)
<b>T</b> 1	142.1	198.1	60.8	268.5	56.7	62.9
T2	-35.1	-81.4	-91.7	-278.7	37.0	17.3
T3	0.1	0.1	0.0	0.2	0.0	0.0
T4	-4.2	-7.3	-30.4	-39.8	2.2	5.5
T5	0.1	1.0	8.1	-1.5	0.0	0.3
<b>T</b> 7	-0.7	-3.0	-2.3	-33.8	1.1	4.8
Т9	-0.6	-2.9	-22.8	-22.2	0.9	4.3
T11	-0.7	0.0	-0.1	-0.5	1.1	4.8
T13	0.0	0.3	0.5	1.6	0.0	0.0
<b>T</b> 6	-1.3	-2.6	-0.1	18.7	0.8	-0.4
T8	0.3	-2.6	-22.1	-12.8	0.1	0.3
T10	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0	0.0
T12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F	100	100	100	100	100	100

表1 盐度通量计算各项在总量中所占百分比

方向。对应于表 1 中的计算结果,各断面的弥散系数 D、D1、D2 和 D3 的量值如表 2 所示。 表2 弥散系数计算结果(m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>)

断面	时间(年、月)	潮汛	D1	D2	D3	D
A3-A5	1990-06	大潮	771	256	372	1399
B1-B4	1981-08	大潮	233	183	202	610
A6~A8	1983-12	大潮	367	116	128	611
A6-A8	1983-12	小潮	190	-28	254	416
A10-A12	1983-12	大潮	174	71	244	489
A10-A12	1983-12	小潮	95	-1	228	322

Tab.2 Dispersion coefficient for each cross-section

#### 2.2 计算结果讨论

通量和弥散系数计算结果说明象山港水域按水体混合状况和混合控制机理可划分为 三个子区,即象山港狭湾外的平流和潮弥散混合区、象山港狭湾内段重力环流和潮振荡垂 向切变混合区和象山港狭湾外段的一个过渡区。

象山港狭湾外,即由 A1-A2 断面和 A3-A5 断面水体混合的主要控制机制是余流和潮 流的时空变化引起的平流混合和潮弥散(表 1—2)。这个区域实际上是一个潮通道,潮流 强劲,流速一般都在 1ms<sup>-1</sup>以上,最大实测流速在 2ms<sup>-1</sup>以上,最大余流流速在 0.3ms<sup>-1</sup> 以上,平流混合作用强烈(董礼先等,1999)。此外,这一区域水下地形变化激烈,区域内各 处潮流的流速、流向和位相变化较大。潮流和地形相互作用,既可产生强烈的涡动又可因 涡度传输产生小尺度的潮余流(Pingree *et al*,1980; Kashiwai,1984)、潮流和小尺度潮余 流综合作用会导致水质点在潮尺度内的水平运动,即"潮随机漫游(tidal random walk)" 运动。这种水质点的"潮随机漫游"运动是潮余流空间结构尺度较小时引起水体弥散的主 要动力机制(Zimmerman,1986)。表 2 显示 A3-A5 断面潮弥散强烈,潮弥散系数较大。表 1 说明除了表证平流混合的 T1 和 T2 两项外,T4 项的绝对值较大,即潮流与盐度的潮变动 关系项对弥散的贡献较大,并由此导致潮弥散的作用强烈。虽然断面资料显示 A3-A5 断 面存在较强的垂、横向盐度分布差异和余环流差异(董礼先等,2000),但通量分析和弥散 系数的计算结果说明这些差异引起的弥散作用与潮弥散作用相比仍是次要的(表 2)。

A10-A12 断面的通量分析和弥散系数计算结果说明象山港狭湾内段的混合机理与狭 湾外大不相同。象山港狭湾内纵深较长,宽度较小,潮流在地形的约束下基本沿岸线方向 流动。水体在随潮流往复运动中在纵向上与周围水体进行掺混的机率较小,加上湾内的 潮流均较湾外弱,因而从盐通量分析计算结果和盐度弥散系数上看,狭湾内远不如湾外的 A3-A5 断面的潮弥散作用强烈(表 2)。但由于狭湾内低盐水由表层下泄和外海高盐水沿 底层入侵造成了整个象山港狭湾内的水体层化和重力余环流。重力余环流表层向海而底 层向湾顶,流速在 5—10cms<sup>-1</sup> 左右(董礼先等,2000)。上、下层水体在相向运动的过程 中,垂向的混合作用使得湾内水体得以纵向弥散。在深度较大的狭长水域中,垂向环流和 潮振荡中的垂向剪切作用一般都在水体的纵向弥散中扮演着重要作用(Dyer,1974; Hughe *et al*,1980; Su *et al*,1987)。计算结果表明,垂向环流和潮振荡的垂向剪切作用在 A10-A12 断面的混合作用显著。即使在冬季大潮期间重力环流和潮振荡的垂向剪切作用 对纵向弥散的贡献也占主导地位,为潮弥散的140%,为横向环流和潮振荡的横向剪切作 用的340%。在冬季小潮期间,横向环流和潮振荡中的横向剪切作用可以忽略不计,垂向 环流和垂向剪切作用在纵向弥散中的贡献为潮弥散贡献的240%。从A6-A8 断面盐度分 布的冬、夏对比看,由于狭湾内段水体夏季层化将加剧,重力环流和潮振荡的垂向剪切作 用的贡献在夏季水体混合中的作用会比冬季更大,而潮振荡的横向剪切和横向环流对弥 散的贡献也会随水体层化程度的加强而进一步减弱(Wunterwerp,1983)。

A6-A8(B1-B4)位于狭湾口内侧,断面附近为狭湾内段和狭湾外水域的过渡区,混合 状况和控制机理均处于两者之间而且复杂多变。这一区域的潮流强劲,最大潮流速可达 180cms<sup>-1</sup>,而且狭湾口附近水域较为开阔,潮流的流速、流向和位象空间变化较大,潮弥散 作用强烈。狭湾内的垂向环流和盐度层化,狭湾外的水平环流和盐度差异均影响这一断 面的水体混合。潮弥散、潮振荡垂向剪切和重力余环流及潮振荡中的横向剪切和水平余 环流在水体纵向混合中的地位随着季节和潮汛的变化而交替上升。冬季大潮期间,水体 垂向层化轻微,重力环流和潮振荡垂向剪切作用对纵向弥散的贡献与横向环流和剪切作 用的贡献相当,二者都为潮弥散的三分之一左右。冬季小潮期间重力环流和潮振荡的垂 向剪切作用对纵向弥散的贡献比潮弥散的大 30% 左右,占总弥散的 60% 以上。由于夏季 水体层化强烈,即使在大潮期间重力环流和潮振荡的垂向剪切作用也可以和潮弥散相当, 比横向环流和剪切作用还大些(表 2)。狭湾外的水平环流的一部分在柯氏力和离心力的 作用下携带着狭湾外高盐水沿狭湾口的 A8 站一侧下层向狭湾内入侵,并由此造成等盐度 分布和环流的横向差异,加大了横向环流和横向剪切对纵向弥散的贡献。一般在较为宽阔 的部分混合水域中横向环流和剪切效应对水体混合的作用总是不可忽略的 (Fischer, 1972; Dyer, 1974)。但和 A10-A12 断面一样, A6-A8 断面的水平环流和潮振荡的横向剪切 效应对水体混合的作用只有在大潮期间对水体纵向弥散才是重要的,小潮期间可以忽略 不计。

## 3 结语

3.1 象山港水域狭湾内、外的混合状况和控制机制有很大不同。狭湾外区域是一个水下 地形激烈变化、潮流强劲的潮通道。在水平环流、小尺度的潮余流与潮流的共同作用下水 体的平流混合和潮弥散作用显著,水体混合能力较强。

**3.2** 在 A10-A12 断面以里的狭湾内段,水域横向尺度较小,潮流较弱。水体在随潮流的 往返运动中产生的潮弥散作用较狭湾外小得多。重力环流和潮振荡垂向剪切的混合作用 始终占据着主导地位。水体的纵向混合能力比狭湾外小。

3.3 狭湾外段的 A6-A8 断面附近为狭湾内、外两种不同混合和弥散的过渡区,水体弥散的 主要控制因子随季节和潮汛而变。在冬季大潮期间,潮弥散起主要作用;小潮期垂向环流和 潮振荡垂向切变的弥散作用占主导地位。在夏季大潮期间,潮弥散、重力余环流和潮振荡的 垂向剪切及水平环流和潮振荡的横向切变三者的弥散贡献相当,各占三分之一左右。

#### 参考文献

王康墡,苏纪兰,1987.长江口南港环流及悬移物质输运的计算分析.海洋学报,9(5):627-638 董礼先,苏纪兰,2000.象山港盐度分布和混合分析 I. 盐度分布和环流结构.海洋与湖沼,31(2):151-158 Dyer K R, 1974. The salt balance in stratified estuaries. Est Coast Mar Sci, 2:273-281

Fischer, H B, 1972. Mass transport mechanisms in partially mixed estuaries. J Fluid Mech, 53(4):671-687

Kashiwai M, 1984. Tidal residual circulation produced by a tidal vortex, 1. Life-history of a tidal vortex. J Oceanor Soc, 40:279-294

Hughe F W, M Rattray Jr, 1980. Salt flux and mixing in the Columbia River estuary. Est Coast Shelf Sci, 10:479-493

Pingree R, L Maddock, 1980. Tidally induced residual flows around an island due to both friction and rotational effects. Geophys. J R Astron Soc, 63:533-546

Su Jilan, Wang Kangshan, 1987. The suspended sediment balance in Changjiang estuary. Est Coast Shelf Sci, 23:81-96

Zimmerman J T F, 1986. The tidal whirlpool: A review of horizontal dispersion by tidal and residual currents. Neth J Sea Res, 20:133-154

Wunterwerp J C, 1983. Decomposition of mass transport in narrow estuaries. Est Coast Shelf Sci, 16:627-638

# SALINITY DISTRIBUTION AND MIXING IN XIANGSHANGANG BAY II. MIXING ANALYSIS

#### DONG Li-xian, SU Ji-lan

(Key Laboratory of Ocean Dynamic Processes and Satellite Oceanography, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou, 310012)

Abstract The mixing processes in Xiangshangang Bay are analyzed using a data set collected during 1981–1990 and the flux balance methods.

The results show that the region along the Niubi Channel and Fodu Channel is a tidal passage, the water mass is well mixed by current advection and tidal dispersion. In the inner part of Xiangshan gang Bay, the mixing is dominated by a combination of residual gravitational circulation and the vertical tidal current shear effects. The water mass is not longitudinally well mixed as in the Niubi and Fodu Channels.

The region near the A6-A8 cross section is a transient region between the two regions mentioned above. Residual gravitational circulation, vertical shear effects, lateral residual circulation, lateral shear effect, and tidal dispersion vary with the season and tide.

Key words Mixing Flux analysis Xiangshangang Bay

Subject classification number P731