

强潮作用下钱塘江河口盐水入侵机制

李若华¹, 马继侠¹, 张舒羽¹, 潘冬子²

(1. 浙江同济科技职业学院, 浙江 杭州 311231; 2. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020)

摘要:基于钱塘江河口段上、中、下游 3 个站点连续 5 天高频次的流速、潮位、水深、含氯度等实测资料,采用通量机制分解法计算每个潮周期的含氯度输运通量,分析了含氯度输运通量与潮差的相关性、水盐输运分离现象、强潮作用下盐水入侵的动力机制及其对抗咸的启示。结果表明:河口段下游的含氯度输运主要受斯托克斯效应控制,而上游则受平流输运和潮泵输运共同主导,垂直切变作用对含氯度输运的影响非常有限;在河口段的上游存在水体向下游输运,而含氯度向上游输运的现象,该现象会加剧上游河段的盐水上溯;向陆的含氯度输运通量与潮差存在较强的正相关关系,可将潮差作为盐水入侵程度及抗咸调度的重要指标。

关键词:盐水入侵;通量机制分解法;潮差;钱塘江河口

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)05-0037-08

Saltwater intrusion mechanism in the Qiantang River estuary under strong tide//LI Ruohua¹, MA Jixia¹, ZHANG Shuyu¹, PAN Dongzi² (1. Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, China; 2. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Based on 5 consecutive days of high-frequency measured data of flow velocity, tide level, water depth and Chlorine at three stations in upstream, midstream and downstream of the Qiantang River estuary, the salt flux for each tidal cycle was calculated by the flux mechanism decomposition method. The dynamic mechanism of saltwater intrusion under strong tide was studied. The correlation between salt flux and tidal range, the phenomenon of water and salt transport separation, and the enlightenment of anti-salt were analyzed. The results show that the salt transport in the lower reaches of the estuary is mainly controlled by the Stokes effect, while the upstream is dominated by advection transport and tidal pump transport, and the vertical shear has a very limited impact on salt transport. In the upper reaches of the estuary the phenomenon that the water body is transported downstream and the salt is transported upstream exist, which can strengthen saltwater intrusion in the upstream reaches. The net salt flux to the land has a strong positive correlation with the tidal range. The tidal range can be used as an important indicator for saltwater intrusion and anti-salt scheduling.

Key words: saltwater intrusion; flux mechanism decomposition method; tidal range; Qiantang River estuary

潮汐河口的水流为典型的往复流运动,但若以一个涨落潮周期计,通过某一断面的物质大部分会被抵消,虽然潮周期的余流通常比瞬时流速小 2 个数量级,但对于物质的长期输运而言,人们更加关注以潮周期为时间尺度的输移^[1]。20 世纪 70 年代后,在潮周期余流分解机制的基础上,多位学者^[2-4]先后对物质输运通量的机制分解做了深入研究,发展了通量机制分解法,将潮汐河口的物质输运分解为平流输运、潮泵输运和垂向切变输运。

通量机制分解法以其明确的物理概念被广泛应用于潮汐河口的保守物质(如悬沙、盐分等)输运通量计算,用来分析不同的河口环境下每个动力因子

对物质输运的贡献^[5-7]。陈炜等^[8]根据连续 8 天的水沙观测资料分析指出,长江口北支上游段河道悬沙输移以平流输运为主,下游段则以潮泵输运为主。吴创收等^[9]根据瓯飞浅滩大范围海域的潮流和含沙量资料分析指出,瓯江口、鳌江口、飞云江口等河口区以平流输沙为主,而北部岛屿区、中部海域和南部海域则以潮泵输沙为主。王以菲等^[10]指出胶州湾盐分以平流输运为主,潮泵与垂向切变输运作用较弱。朱雅敏等^[11]指出伶仃洋河口湾的纵向盐输运通量主要是由平流输运控制,但斯托克斯漂移和垂向净环流引起的盐分输运也不容忽视。盐水入侵是威胁河口区淡水利用的重要因素之一^[12-14],因此

研究河口区的盐水入侵机制对河口水资源的开发具有重要意义。然而目前对河口物质输移机制的研究主要集中在泥沙方面,较少的盐分输移机制成果也主要集中在受潮汐动力控制的河口湾或近海水域,受径流和潮汐动力共同控制的河口段的研究成果较少,而在一些强潮河口,咸潮可以上溯至河口上游很远的区域^[14]。

钱塘江河口是世界著名的强潮河口,大潮汛期咸潮可上溯至距离杭州湾口超过 200 km 的闻家堰以上,严重影响着两岸的淡水利用^[15]。因生产的需要,已有多位学者对钱塘江河口的咸潮入侵问题进行了研究。韩曾萃等^[16]在 20 世纪 80 年代就采用一维水流盐度数值模型研究了钱塘江河口盐水入侵规律,之后又建立了长历时的床层预报模型,用于指导顶潮拒咸^[17]。史英标等^[18]采用钱塘江河口段长历时实测水文、含氯度资料,分析了强潮作用下盐水入侵的时空变化特征。潘存鸿等^[19-20]通过实测潮汐、涌潮和含氯度资料及数学模型,分析了径流、潮汐及涌潮、江道地形等主要因素对钱塘江河口盐水入侵的影响。李若华等^[21]基于多个站点的实测资料,分析了钱塘江河口七堡河段含氯度时空变化规律及其与水文的关系。上述成果多是基于盐度的瞬时变化进行分析,对潮周期尺度的盐分输运机制及动力因素尚未开展研究,而这对于了解咸潮上溯规律,指导抗咸用淡非常重要。

强潮河口大、小潮汛期期间盐水入侵强度差异巨大,对河口上中游的盐水入侵主要发生在大潮汛期期间,钱塘江河口的实测资料表明,其盐水入侵主要发生在枯季大潮汛期^[21],因此本文收集了 2007 年 10 月大潮汛期期间钱塘江河口上、中、下游 3 个站点连续 5 天高频次的流速、潮位、水深、含氯度(河口通常测定水体含氯度代表盐度)等实测资料,虽然该资料距今已有近 15 年,但因是连续 5 天的日夜连续人工观测,且频次较高,至今仍是一次非常难得的实测资料。本文基于该资料分析了含氯度与潮位、流速的关系,采用通量机制分解法计算了各站每个潮周期的含氯度输运通量,研究了含氯度在大潮汛期期间的上溯机制,以期能对强潮河口抗咸提供参考。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区域

钱塘江是浙江省最大的河流,富春江电站以下为感潮河段,即钱塘江河口。钱塘江河口潮汐主要受 M2 分潮控制,每日两涨两落。钱塘江闻家堰—澉浦段为河口段(图 1),长 116 km,受径流和潮汐共同作用。澉浦断面宽 16.5 km,实测最大潮差超过

9 m,平均潮差为 5.64 m。澉浦以上河宽逐渐缩窄,潮差逐渐减小,至七堡断面河宽仅 1.6 km,平均潮差为 0.79 m。潮汐上溯过程中潮波发生变形,涨潮时间逐渐缩短,落潮时间逐渐延长,澉浦和七堡的平均涨潮时间分别为 5.47 h 和 1.42 h。受径流、潮汐及河床冲淤的影响,咸潮入侵呈现明显的季节变化。丰水期(3—7 月)径流量大,咸潮入侵较弱;枯水大潮期(8—11 月)径流量小,外海潮汐强,咸潮入侵严重;枯水小潮期(12 月至次年 2 月)径流量虽小,但由于澉浦上游江道淤积导致潮汐上溯能力减弱,咸潮入侵也较弱。闻家堰—七堡河段是杭州最重要的饮用水源地,在 8—11 月的大潮汛期经常受到咸潮入侵的威胁。

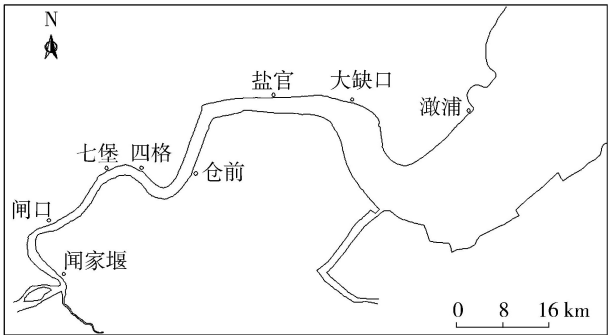


图 1 钱塘江河口段平面图及测站位置

1.2 野外观测

2007 年 10 月 25—30 日大潮汛期期间,分别在七堡、盐官、澉浦等 3 个断面的主流位置进行了定点全潮观测,取得了这 5 天(10 个全潮)连续的流速、潮位、含氯度等资料。观测期间,每个站点固定 1 条工程测船,采用亚米级差分 GPS 对工程测船进行定位,每 3 h 进行位置检测,确保无测点移位发生。采用自记水位仪配合直立水尺进行潮位观测,每日进行水位仪走时核对和人工水尺读数比测校核。采用测深仪测量水深,采用直读式流速仪和 ADP 测量流速和流向,采用横式采样器取水样,用硝酸银滴定法测定含氯度。垂线上采用六点法观测流速和含氯度,即表层(水面以下 0.5 m 处)、0.2H(H 为水深)、0.4H、0.6H、0.8H、底层(距河底 0.5 m),水深小于 2 m 时采用三点法观测。潮位、流速、含氯度等每间隔 30 min 观测一次。

观测期间,上游径流量介于 320 ~ 343 m³/s 之间,变化较小,即观测数据的时间变化主要受潮汐变化影响,可忽略径流量变化造成的影响。

1.3 通量机制分解法^[6]

通量是指单位时间内流经某一断面的物质量,通量机制分解法是研究水、沙、盐等通量输运机制的方法,其本质是将瞬时流速、物质浓度(如含氯度、

含沙量)分别分解成为4项,水深分解为2项。瞬时流速 u 、物质浓度 c 和瞬时水深 h 分别分解如下:

$$u(x,z,t) = \bar{u}_0 + \bar{u}_t + u'_0 + u'_t \quad (1)$$

$$c(x,z,t) = \bar{c}_0 + \bar{c}_t + c'_0 + c'_t \quad (2)$$

$$h(x,t) = h_0 + h_t \quad (3)$$

式中: x 为顺河槽的纵向坐标; t 为时间; z 为相对水深 ($1 \geq z \geq 0$); 下标“0”与“ t ”分别表示潮平均项和潮振荡项; 上标“-”与“ $'$ ”分别表示垂线平均项和垂向偏差项。

河口单宽潮周期平均输水量为

$$\langle Q \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^1 u h dz dt = \bar{u}_0 h_0 + \langle \bar{u}_t h_t \rangle \quad (4)$$

式中: $\langle * \rangle$ 为潮平均; T 为一个涨落潮流周期的时间; $\bar{u}_0 h_0$ 为平均流项; $\langle \bar{u}_t h_t \rangle$ 为潮位与潮流相关项, 也称斯托克斯漂移效应。式(4)还可以表示为

$$\langle Q \rangle = h_0 (\bar{u}_0 + \bar{u}_s) = h_0 \bar{u}_L \quad (5)$$

其中 $\bar{u}_0 = \bar{u}_E$ $\bar{u}_s = \langle \bar{u}_t h_t \rangle / h_0$ $\bar{u}_L = \bar{u}_E + \bar{u}_s$ 式中 $\bar{u}_E$ 、 $\bar{u}_s$ 、 $\bar{u}_L$ 通常被称为一维垂向平均的欧拉、斯托克斯和拉格朗日余流。

含氯度单宽潮周期净输运通量可以分解为7个主要的通量项:

$$\begin{aligned} \langle F \rangle = & \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^1 h u c dz dt = \\ & T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 = \\ & h_0 \bar{u}_0 \bar{c}_0 + \bar{c}_0 \langle h_t \bar{u}_t \rangle + \bar{u}_0 \langle h_t \bar{c}_t \rangle + h_0 \langle \bar{c}_t \bar{u}_t \rangle + \\ & \langle h_t \bar{c}_t \bar{u}_t \rangle + h_0 \langle \bar{c}'_t \bar{u}'_t \rangle + \langle h_t \bar{c}'_t \bar{u}'_t \rangle \end{aligned} \quad (6)$$

式中: T_1 为平均流输运通量, 为欧拉余流贡献; T_2 为潮流相关项, 称为斯托克斯漂移; $T_1 + T_2$ 为拉格朗日平流输运; T_3 为潮位与含氯度的潮变化项; T_4 为潮流与含氯度的潮变化项; T_5 为潮位、潮流与含氯度的潮变化项; $T_3 + T_4 + T_5$ 为潮泵输运, 由潮位、潮流、含氯度的相位差引起; T_6 为河口垂向重力环流贡献项, 是由

近底床向陆的高物质浓度流和表层向海的低物质浓度流共同作用导致的; T_7 为潮波变形作用下垂向上流速和物质浓度的变化引起的^[22]; $T_6 + T_7$ 为垂向切变输运。

因此, 如有连续实测 u 、 c 、 h 资料, 便可以根据式(6)定量计算各分解项对净通量的贡献, 从而探讨物质输移的机理。

2 结果分析

2.1 含氯度与潮位、流速的关系

由图2可见, 激浦站涨、落潮历时接近, 潮位形态接近于正弦曲线, 涨、落急流速(涨潮流速为正)大小相当; 含氯度与潮位基本同步变化, 随潮位升高而升高, 但滞后于流速的变化, 含氯度峰、谷值发生在涨憩、落憩附近; 整个大潮汛期间, 含氯度的谷值逐渐抬高, 峰值在前几个潮中也逐渐抬高, 之后随高潮位的高低变化而变化。

与激浦站相比, 盐官站的涨潮历时有所缩短, 落潮历时有所延长, 落潮流速持续时间显著大于涨潮流速持续时间, 但落急流速明显小于涨急流速; 与激浦站类似, 盐官站的含氯度与潮位基本同步变化, 但滞后于流速的变化, 含氯度峰、谷值发生在涨憩、落憩附近; 在大潮汛的前期阶段, 含氯度的峰、谷值均逐渐抬高, 之后峰值随高潮位的高低变化而变化, 而谷值则逐渐降低。

因上游河段涨潮历时大幅缩短、落潮历时大幅延长, 导致七堡站的涨落潮形态严重不对称; 含氯度变化滞后于潮位和流速的变化, 峰值发生在高潮位和涨急过后; 由于咸潮上溯至七堡河段已是强弩之末, 故七堡站的含氯度呈现典型的冲击形态, 涨潮到来后, 含氯度随之升高, 落潮后含氯度逐渐降低, 到落潮后期, 含氯度已接近于零。

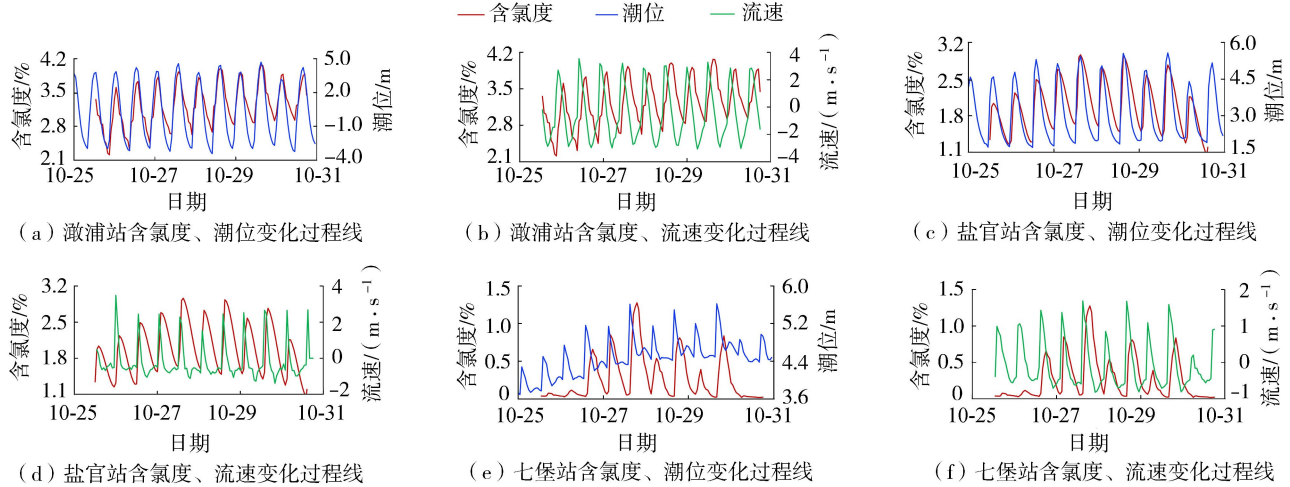


图2 大潮汛期间沿程各站含氯度、潮位及流速变化过程线

2.2 含氯度输运通量

基于通量机制分解法计算了浹浦、盐官、七堡 3 个站的纵向单宽含氯度输运通量,各贡献项的数值大小与输运方向见表 1~3。

a. 平流输运 (T_1+T_2)。 T_1 和 T_2 项分别代表潮周期平均运动和潮振荡对物质的输运作用。由于 $h_0、\bar{c}_0$ 均为正值,因此 T_1 项的正负取决于潮平均流速的方向,大小主要取决于平均流的输运速度和平均含氯度。 T_2 项的方向和大小主要取决于流速和水位的相位差及平均含氯度。浹浦站的 T_1 项在大部分潮周期中方向向陆,而盐官、七堡站的 T_1 项方向主要向海,表明在大潮汛期间浹浦站涨潮流占优,促使物质向陆输运,而盐官、七堡站落潮流占优,促使物质向海输运。3 个站的 T_2 项方向均向陆,表明在大潮汛期间河口段的潮振荡作用总是促使物质向陆输运。就 $T_1、T_2$ 的数值大小而言,浹浦、盐官站的 T_2 大于 T_1 ,而七堡站的 T_1 大于 T_2 ,由此可见,即使在平流输运中,不同河段的主导因素也不同。

b. 潮泵输运 ($T_3+T_4+T_5$)。 $T_3+T_4+T_5$ 的大小与方向由潮位、流速与含氯度的相位差,三者的潮振荡强度及潮周期不对称程度决定。由图 2 可见,浹浦、盐官站的含氯度与潮位同相位变化,但与潮流存在相位差,故而 $T_3、T_4、T_5$ 中 T_4 数值最大;七堡站的潮

位和潮流与含氯度变化均存在相位差,但也是 T_4 数值最大。总的来说,浹浦、盐官站的潮泵输运量均较小,相对于平流输运可忽略不计,但七堡站的潮泵输运量与平流输运同量级,在含氯度输运中不可忽视。

c. 垂向切变输运 (T_6+T_7)。垂向切变输运与流速、物质浓度的垂向变化程度相关,反映了河口的垂向混合程度。由表 1~3 可见,浹浦、盐官、七堡 3 个站的 T_6+T_7 项均较小,不仅远小于平流输运量,也小于潮泵输运量,这也更进一步证实了钱塘江河口水体混合强烈,含氯度垂向分布较为均匀^[21]。

d. 总输运通量。对于浹浦站,大潮汛期间含氯度净通量均向陆输运, T_2 对含氯度的输送起主导作用,其次为 T_1 , $T_3+T_4+T_5$ 和 T_6+T_7 的贡献较小; T_2 总是向陆输运,波动幅度较小,介于 2.3~3.6 kg/s 之间; T_1 在前 2 个潮向海输运,后转为向陆输运,最后又转为向海输运,数值波动较大。对于盐官站,大部分潮周期的含氯度净通量向陆输运, T_1 使含氯度向海输运, T_2 使含氯度向陆输运, T_2 对含氯度的输送起主导作用, $T_3+T_4+T_5$ 和 T_6+T_7 均可忽略不计。对于七堡站,大部分潮周期的含氯度净通量向陆输运, $T_1、T_2、T_3+T_4+T_5$ 起主要作用,其中 T_1 使含氯度向海输运, T_2 和 $T_3+T_4+T_5$ 使含氯度向陆输运,它们共同决定了含氯度净通量的方向;大潮汛期间,各动力机

表 1 大潮汛期间浹浦站各潮周期的含氯度输运通量

潮周期	潮差/m	输运通量/(kg·s ⁻¹)							净通量
		T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	
1	6.90	-1.500	2.405	-0.067	0.186	0.141	0.133	0.004	1.302
2	6.83	-0.219	2.354	0.069	-0.119	0.137	0.124	0.009	2.354
3	7.31	0.248	2.346	0.008	0.181	0.191	0.102	0.018	3.093
4	6.82	0.536	2.605	0.017	-0.179	-0.023	0.163	0.019	3.138
5	7.78	2.275	2.808	0.075	-0.378	0.089	0.141	0.025	5.034
6	6.69	0.086	3.202	0.002	-0.025	0.017	0.103	0.010	3.396
7	7.83	1.235	3.651	0.037	-0.120	-0.006	0.190	0.001	4.987
8	6.78	1.204	3.244	0.033	-0.038	0.115	0.191	0.014	4.765
9	7.66	2.492	3.058	0.072	-0.357	0.060	0.207	0.103	5.634
10	5.85	-1.551	3.260	-0.025	0.068	0.061	0.069	0.100	1.980

注:通量为正表示含氯度向陆输运,反之向海输运。潮差为一个潮周期内涨潮前的最低水位与涨潮后的最高水位之差。下同。

表 2 大潮汛期间盐官站各潮周期的含氯度输运通量

潮周期	潮差/m	输运通量/(kg·s ⁻¹)							净通量
		T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	
1	3.07	-0.407	0.609	-0.033	0.017	-0.015	0.001	-0.001	0.171
2	3.19	-0.160	0.925	-0.014	-0.019	-0.038	-0.003	-0.003	0.688
3	3.64	-0.570	1.488	-0.043	0.052	-0.015	-0.002	-0.004	0.906
4	3.44	-0.574	1.440	-0.046	0.064	-0.016	-0.004	-0.005	0.859
5	3.86	-1.177	2.063	-0.113	0.304	0.051	-0.008	-0.010	1.110
6	3.17	-1.497	1.414	-0.137	0.139	0.009	-0.002	-0.004	-0.077
7	3.78	-0.490	1.876	-0.051	0.139	0.020	-0.008	-0.008	1.478
8	3.09	-1.232	1.270	-0.107	0.050	-0.016	-0.002	-0.004	-0.041
9	3.78	-0.565	1.825	-0.064	0.230	0.115	-0.007	-0.009	1.526
10	2.37	-0.903	0.749	-0.087	0.035	0.025	0.001	-0.001	-0.182

表 3 大潮汛期七堡站各潮周期的含氯度输运通量

潮周期	潮差/m	输运通量/(kg·s ⁻¹)							
		T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	净通量
1	0.73	-0.0022	0.0037	0.0000	-0.0005	-0.0008	0.0001	0.0000	0.0003
2	0.73	0.0134	0.0053	-0.0001	-0.0016	-0.0009	0.0004	0.0001	0.0166
3	1.13	0.0520	0.0568	-0.0005	0.0698	-0.0232	0.0005	0.0001	0.1555
4	0.88	-0.1017	0.0723	0.0002	0.0981	-0.0318	0.0011	0.0004	0.0386
5	1.28	-0.1830	0.1283	0.0005	0.2642	-0.0379	0.0010	0.0004	0.1735
6	0.71	-0.4646	0.0508	-0.0032	0.3309	-0.0058	0.0006	0.0005	-0.0908
7	1.07	-0.0129	0.0952	0.0001	0.0927	-0.0389	0.0014	0.0008	0.1384
8	0.71	-0.1378	0.0166	-0.0007	0.0867	-0.0039	-0.0008	0.0001	-0.0398
9	1.13	-0.0685	0.0790	0.0003	0.0533	-0.0383	-0.0012	0.0006	0.0252
10	0.33	-0.0465	0.0009	-0.0002	0.0048	0.0001	-0.0003	0.0000	-0.0412

制下的含氯度通量及总含氯度通量均呈现先增大后减小的趋势,在第 5、6 个潮达到最大;总体来说,仍以 T_1 输送率最大, $T_3+T_4+T_5$ 次之, T_2 又小一些, T_6+T_7 可忽略不计。

3 讨论

3.1 含氯度输运通量与潮差的关系

潮差是潮汐动力的重要指标,对河口的盐水入侵^[23]、悬沙输运^[24] 都具有重要意义。高华斌等^[25] 基于实测资料建立了长江口潮差与盐度的相关关系,赵雪峰等^[26] 采用数学模型研究了珠江口盐水入侵距离随潮差的变化规律。Han 等^[15] 基于多年观测资料指出钱塘江河口的咸潮入侵强度与潮差呈正相关,并基于此提出了大潮汛期多放水、小潮汛期少放水的抗咸调度策略,但钱塘江河口潮差与咸潮入侵强度的相关程度具体如何,一直未有学者给出。本文将各潮周期向陆输运的含氯度输运通量与对应潮周期的潮差建立相关关系以反映潮差与咸潮入侵强度的相关程度,相关系数(R^2)见表 4。若以相关系数大于 0.5 作为具有较强相关性的指标,可知在大潮汛期期间 3 个站的含氯度总输运通量与潮差均具有较强的相关性,相关程度由大到小排序为盐官站、七堡站、澉浦站。同时也可以看出,各贡献分量与潮差的相关性差异较大,澉浦站的 T_1 与潮差的相关性较强,但 T_2 与潮差基本没有相关性,盐官站、七堡站的 T_2 与潮差有较强的相关性,但 T_1 与潮差基本没有相关性。表明澉浦站的含氯度输运主要受欧拉余流控制,而盐官站、七堡站的含氯度输运主要受斯克托斯余流控制。

由含氯度与潮位的过程曲线可见(图 2),3 个站均表现出前 5 个潮中含氯度峰值逐渐抬升,后 5 个潮中含氯度峰值随高潮位(或潮差)高低变化而变化的特征,似乎在后 5 个潮中含氯度与潮差相关更密切,因此将后 5 个潮中的含氯度输运通量与潮差建立相关关系,相关系数(R^2)见表 4。由表 4 可

见,含氯度总输运通量与潮差的相关程度排序发生了变化,由大到小分别为澉浦站、盐官站、七堡站,澉浦站的相关性大幅提高,澉浦站的 $T_3+T_4+T_5$ 与潮差的相关性大幅提高,表明在后 5 个潮中澉浦站的潮泵输运加强了,同时也可看到盐官站、七堡站的 T_2 与潮差的相关性也大幅提高,表明在后 5 个潮中盐官站、七堡站的斯克托斯漂移输运加强了。对应图 2 可见,大潮汛初期,水位较低,随着大潮汛的到来高水位逐渐升高,前 5 个潮中河口处于蓄潮阶段,上游径流和下游潮量在河口段蓄积,涨落潮力量不均衡,而在后 5 个潮中,高水位随外海潮汐的强弱交替变化,故后 5 个潮中含氯度的输运与反映潮汐动力强弱的潮差相关性较好。

表 4 各站含氯度输运通量与潮差的相关系数

站点	10 个潮周期相关系数				后 5 个潮周期相关系数			
	T_1	T_2	$T_3+T_4+T_5$	净通量	T_1	T_2	$T_3+T_4+T_5$	净通量
澉浦	0.61	0.00	0.15	0.50	0.78	0.09	0.66	0.82
盐官	0.02	0.73	0.47	0.77	0.24	0.99	0.55	0.76
七堡	0.01	0.73	0.04	0.66	0.03	0.85	0.01	0.45

因钱塘江江道较宽(最窄的七堡断面河宽约 1.6 km),本文主要采用每个断面主流处一条垂线的实测资料进行单宽水含氯度通量纵向输运分析。实际上受河床地形、风等影响,还可能存在少量的横向水盐输运,包括含氯度的横向扩散等,同时现场观测根据水深情况垂向上采用六点法或三点法监测代表垂向的分层情况,实际上也存在一定误差,但总的来说根据实测资料分析得出的相关性基本能够反映水盐输运的机制和相关性。

3.2 含氯度输运通量与水体输运的分离现象

物质溶解或悬浮在水体中随潮流一起运动,因此一般认为水体和物质的输运方向是一致的,故通常将潮周期余流与潮周期平均浓度的乘积作为该潮周期物质的输运通量^[22,27]。但盐水入侵现象表明河口的盐度与水体存在潮周期输运方向不同的现象,朱首贤等^[28] 通过二维水体和物质长期输运速度

的对比分析,提出了河口区物质和水体长期输运分离概念,并指出潮泵输运和垂向切变输运是造成物质和水体长期输运分离的原因。王以菲等^[29]基于实测资料分析发现,胶州湾也存在水盐输运分离现象,英晓明等^[30]基于实测资料分析认为洋山港海域水体和悬沙输运存在明显的分离现象。

基于观测资料采用式(4)计算出3个站点的单宽潮周期平均输水量,与含氯度输运通量列于表5。由表5可见,在大潮汛期间,澈浦站的水体和含氯度的输运方向一致,均向陆输运;盐官站的水体和含氯度输运方向也基本一致,主要向陆输运,虽然在第8个潮周期出现了水体向陆输运、含氯度向海输运的现象,但输运量均较小,很可能是观测的精度误差所致;七堡站有5个潮周期水体向陆输运,7个潮周期含氯度向陆输运,在第4、5个潮周期中出现了水体向海输运,而含氯度却继续向陆输运的现象,从而导致含氯度在第4、5个潮周期中继续升高(图2)。由此可见,钱塘江河口在上游河段出现了水盐输运分离的现象,这会加剧上游河段的咸潮入侵程度,对抗咸非常不利。

3.3 对抗咸的启示

由表5可见,在整个大潮汛期间,澈浦站各个潮周期的含氯度均向陆输运,澈浦站上游约90 km的七堡站在10个潮周期中仍有7个潮周期的含氯度向陆输运,这大大加剧了钱塘江河口的咸潮入侵。钱塘江河口是两岸重要的淡水资源,杭州市85%的生活用水取自河口闻家堰—七堡河段,为压咸取淡,通过联合调度上游新安江、富春江水库下泄流量抵制盐水入侵,常将七堡站的含氯度大小作为杭州取水口是否受咸潮影响的重要指标^[14]。七堡站的含氯度受径流、潮汐、江道地形、涌潮等多重影响,快速准确地预测七堡站的含氯度相当艰难^[19,31-32]。潮周期的净含氯度通量与潮差的相关性分析表明两者具有较强的相关性,潮差大则上溯的净含氯度通量多,

因此可通过预报七堡潮差代替预报七堡含氯度,进而根据七堡潮差大小相应调度上游的下泄流量^[14]。

仔细观察3个站每个潮周期的净含氯度通量可见,在前5个潮周期中,3个站的潮位逐渐抬升,河口段处于蓄潮阶段,净含氯度通量呈现逐渐增大的趋势,并在第5个潮周期达到最大。可见在大潮汛的前期阶段,咸潮入侵逐渐增强,含氯度在澈浦上游的河口段逐渐累积,从而导致在前5个潮周期中含氯度逐渐升高,因此在该阶段,为抵御高含氯度水体上溯,同时稀释高含氯度水体,此时应大幅加大上游淡水下泄。在大潮汛的后5个潮周期中,大、小潮差交替出现,潮差大时向上游输运的净含氯度通量大,因此为精细化利用淡水资源,此阶段可根据潮差大小相应调整上游的淡水下泄量。

4 结 论

a. 澈浦站、盐官站的含氯度与潮位同相位变化,但滞后于潮流的变化,七堡站的含氯度变化滞后于潮位和潮流变化。河口段的含氯度在大潮汛的前期阶段逐渐升高,后期阶段随潮差大小变化而变化。

b. 澈浦站、盐官站的含氯度输运通量主要受欧拉余流和斯托克斯余流输运影响,其中斯托克斯效应在含氯度输运中起主导作用。七堡站的含氯度输运通量受平流输运、潮泵输运共同影响,它们共同决定含氯度输运通量输运的方向。垂直剪切力对含氯度输运的影响非常有限。

c. 潮周期的含氯度输运通量与潮差的相关性分析表明,无论在河口段的上游、中游还是下游,向陆的净含氯度输运通量与潮差之间均存在显著的正相关关系。为节约宝贵的淡水资源,可以根据潮差大小来调度上游水库下泄的抗咸流量。

d. 河口段的上游在部分潮周期中存在水盐输运分离的现象,水体向下游输运,而含氯度却向上游输运,从而加剧了上游河段的咸潮入侵程度。

表5 大潮汛期间澈浦站、盐官站、七堡站水体与含氯度的输运通量

潮周期	潮差/m			净输水量/(m ³ ·s ⁻¹)			净含氯度输运通量/(kg·s ⁻¹)		
	澈浦站	盐官站	七堡站	澈浦站	盐官站	七堡站	澈浦站	盐官站	七堡站
1	6.90	3.07	0.73	0.19	0.12	0.03	1.302	0.171	0.0003
2	6.83	3.19	0.73	0.54	0.44	0.38	2.354	0.688	0.0166
3	7.31	3.64	1.13	0.85	0.46	0.32	3.093	0.906	0.1555
4	6.82	3.44	0.88	1.00	0.4	-0.07	3.138	0.859	0.0386
5	7.78	3.86	1.28	1.55	0.38	-0.08	5.034	1.110	0.1735
6	6.69	3.17	0.71	1.01	-0.04	-1.08	3.396	-0.077	-0.0908
7	7.83	3.78	1.07	1.42	0.62	0.19	4.987	1.478	0.1384
8	6.78	3.09	0.71	1.34	0.02	-0.88	4.765	-0.041	-0.0398
9	7.66	3.78	1.13	1.60	0.61	0.03	5.634	1.526	0.0252
10	5.85	2.37	0.33	0.50	-0.10	-1.61	1.980	-0.182	-0.0412

注:输水量为正表示水体向陆输运,反之向海输运。

e. 大潮汛的前期阶段,河口段处于蓄潮期,含氯度持续向上游净输运,盐度抬升较快,此时应加大上游的淡水下泄量,以压制高含氯度水体上溯。

虽然本次测验覆盖了一个完整的大潮汛过程,但因钱塘江河口的水流、含氯度受径流、潮汐、地形等多种因素影响,为全面掌握该河口的咸潮上溯机制,还需要更多不同时期的资料进行分析。

参考文献:

[1] MEDEIROS C, KJERFVE B. Longitudinal salt and sediment fluxes in a tropical estuary: Itamaraca', Brazil [J]. Journal of Coastal Research, 2005, 21(4): 751-758.

[2] FISHCHER H B. Mass transport mechanisms in partially mixed estuaries [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 53: 672-687.

[3] DYERK R. The salt balance in stratified estuaries [J]. Estuarine and Coastal Marine Science, 1974, 2(3): 273-281.

[4] UNCLE R J, ELLIOTT R C, WESTON S A. Dispersion of salt and suspended sediment in a partly mixed estuary [J]. Estuaries, 1985, 8: 256-269.

[5] 吴祥柏,汪亚平,潘少明. 长江河口悬沙与盐分输运机制分析 [J]. 海洋学研究, 2008, 26(4): 8-19. (WU Xiangbai, WANG Yaping, PAN Shaoming. Analysis of the transportation mechanism of suspended sediment and salt in the Yangtze River Estuary [J]. Journal of Marine Sciences, 2008, 26(4): 8-19. (in Chinese))

[6] 杜家笔,裴艳东,高建华,等. 弱动力浅海中的悬沙输运机制: 以天津港附近海域为例 [J]. 海洋学报, 2012, 34(1): 136-144. (DU Jiabi, PEI Yandong, GAO Jianhua, et al. The suspended sediment transport associated with low flow patterns in shallow waters: a case study from the Tianjin subtidal area [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(1): 136-144. (in Chinese))

[7] 彭俊,刘锋,陈沈良. 黄河三角洲强侵蚀岸段海域的悬沙输运机理研究 [J]. 泥沙研究, 2015, 40(5): 44-50. (PENG Jun, LIU Feng, CHEN Shenliang. Study on suspended sediment transport in sea area off the heavy erosion coast of the Yellow River Delta [J]. Journal of Sediment Research, 2015, 40(5): 44-50. (in Chinese))

[8] 陈炜,李九发,李占海,等. 长江口北支强潮河道悬沙运动及输移机制 [J]. 海洋学报, 2012, 34(2): 84-91. (CHEN Wei, LI Jiufa, LI Zhanhai, et al. The suspended sediment transportation and its mechanism in strong tidal reaches of the North Branch of the Changjiang Estuary [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(2): 84-91. (in Chinese))

[9] 吴创收,赵鑫,黄世昌. 温州瓯飞浅滩及其附近海域枯季悬沙输运机制研究 [J]. 泥沙研究, 2017, 42(6): 66-72. (WU Chuangshou, ZHAO Xin, HUANG Shichang. Study on flow and suspended sediment load in the Oufoi

Shoal and adjacent area in dry season [J]. Journal of Sediment Research, 2017, 42(6): 66-72. (in Chinese))

[10] 王以菲,蔡忠亚,王强,等. 胶州湾夏季盐度长期输运机制分析 [J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(6): 10-17. (WANG Yifei, CAI Zhongya, WANG Qiang, et al. Investigation to long-term transport mechanism of salinity in Jiaozhou Bay in summer [J]. Periodical of Ocean University of China, 2014, 44(6): 10-17. (in Chinese))

[11] 朱雅敏,陈子燊. 珠江口内伶仃洋河口湾盐度输运机理 [J]. 海洋通报, 2008, 27(1): 29-34. (ZHU Yamin, CHEN Zishen. Salinity transport of mechanism in internal Lingdingyang Firth of the Pearl River Mouth [J]. Marine Science Bulletin, 2008, 27(1): 29-34. (in Chinese))

[12] 吴继伟,刘新成,潘丽红. 长江口北支咸潮倒灌控制工程水动力数值模拟 [J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(4): 43-45. (WU Jiwei, LIU Xincheng, PAN Lihong. Hydrodynamic simulation of control project on saltwater intrusion from north branch of Yangtze River Estuary [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(4): 43-45. (in Chinese))

[13] 方神光,崔丽琴. 磨刀门水道枯季咸潮入侵特性及规律 [J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 14-18. (FANG Shengguang, CUI Liqin. Characteristics and rules of seawater intrusion during dry season in Modaomen Waterway [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4): 14-18. (in Chinese))

[14] 李若华,史英标,张舒羽. 钱塘江河口抗咸流量预报模式及其检验 [J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(5): 75-80. (LI Ruohua, SHI Yingbiao, ZHANG Shuyu. Prediction model of salinity-resisting discharge in Qiantang Estuary and its validation [J]. Advances in Science and Technology of Water resources, 2016, 36(5): 75-80. (in Chinese))

[15] HAN Z C, SHI Y B, YOU A J. Prediction and countermeasures of saltwater intrusion in the Qiantang Estuary [J]. Advances in Water Resource and Protection (AWRP), 2014, 2: 62-74.

[16] 韩曾萃,程杭平. 钱塘江江水含盐度计算的研究 [J]. 水利学报, 1981, 12(6): 46-50. (HAN Zengcui, CHENG Hangping. Study on calculation of salinity in Qiantang River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1981, 12(6): 46-50. (in Chinese))

[17] 韩曾萃,程杭平,史英标,等. 钱塘江河口咸水入侵长历时预测和对策 [J]. 水利学报, 2012, 43(2): 232-240. (HAN Zengcui, CHENG Hangping, SHI Yingbiao, et al. Long-term predictions and countermeasures of saltwater intrusion in the Qiantang Estuary [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(2): 232-240. (in Chinese))

[18] 史英标,潘存鸿,程文龙,等. 钱塘江河口段盐度时空分布与预测模型 [J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 409-418. (SHI Yingbiao, PAN Cunhong, CHENG Wenlong, et al. Temporal-spatial variation and numerical forecast model

- of salt water intrusion of the Qiantang Estuarine Reach [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23 (3): 409-418. (in Chinese))
- [19] 潘存鸿, 张舒羽, 史英标, 等. 涌潮对钱塘江河口盐水入侵影响研究[J]. *水利学报*, 2014, 45 (11): 1301-1309. (PAN Cunhong, ZHANG Shuyu, SHI Yingbiao, et al. Study on saltwater intrusion in Qiantang Estuary affected by tidal bore[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45 (11): 1301-1309. (in Chinese))
- [20] 潘存鸿, 张舒羽, 史英标, 等. 钱塘江河口盐水入侵影响因素及数值预报[J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35 (6): 13-19. (PAN Cunhong, ZHANG Shuyu, SHI Yingbiao, et al. Factors and numerical forecast of saltwater intrusion in Qiantang River Estuary [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35 (6): 13-19. (in Chinese))
- [21] 李若华, 夏冬梅, 姚凯华. 钱塘江河口七堡段氯度时空变化及与水文的关系[J]. *水利水电科技进展*, 2019, 39 (2): 21-25. (LI Ruohua, XIA Dongmei, YAO Kaihua. Temporal and spatial variation of chlorinity and its relationship with hydrology in Qibao Section of Qiantang Estuary [J]. *Advances in Science and Technology of Water resources*, 2019, 39 (2): 21-25. (in Chinese))
- [22] 朱首贤, 丁平兴, 史峰岩, 等. 杭州湾、长江口余流及其物质输运作用的模拟研究: II. 冬季余流及其对物质的输运作用[J]. *海洋学报*, 2000, 22 (6): 1-12. (ZHU Shouxian, DING Pingxing, SHI Fengyan, et al. Numerical study on residual current and its effect on mass transport in the Hangzhou Bay and the Changjiang Estuary [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22 (6): 1-12. (in Chinese))
- [23] KNIGHTON A D, MILLS K, WOODROFFE C D. Tidal-creek extension and saltwater intrusion in northern Australia [J]. *Geology*, 1991, 9 (8): 831-834.
- [24] 张赛赛, 杨世伦, 李鹏, 等. 长江口潮差中长期变化对河口生态环境的影响[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38 (2): 317-325. (ZHANG Saisai, YANG Shilun, LI Peng, et al. Medium and long-term changes in tidal range in the Yangtze River estuary and their potential impacts on ecological environment [J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38 (2): 317-325. (in Chinese))
- [25] 高华斌, 唐兵. 应对长江口咸潮入侵的临界流量经验模型研究[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37 (4): 25-29. (GAO Huabin, TANG Bing. Empirical model of critical flow rate in response to saltwater intrusion in the Yangtze River estuary [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37 (4): 25-29. (in Chinese))
- [26] 赵雪峰, 尹小玲. 潮汐强度对河口盐水入侵影响的数值模型研究[J]. *水动力学研究与进展 (A 辑)*, 2017, 32 (6): 756-763. (ZHAO Xuefeng, YIN Xiaoling. Numerical model for effect of tide strength on estuarine salt intrusion [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2017, 32 (6): 756-763. (in Chinese))
- [27] XIE D F, GAO S, WANG Z B, et al. Numerical modeling of tidal currents, sediment transport and morphological evolution in Hangzhou Bay, China [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2013, 28 (3): 316-328.
- [28] 朱首贤, 丁平兴, 沙文钰, 等. 河口物质和水体长期输运分离的理论分析和观测验证 I. 物质和水体长期输运分离的理论分析[J]. *海洋学报*, 2008, 30 (6): 24-29. (ZHU Shouxian, DING Pingxing, SHA Wenyu, et al. The theory analysis and observational validation for the separation of water and substance's long-term transport I. The theory analysis for the separation of water and substance's long-term transport [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30 (6): 24-29. (in Chinese))
- [29] 王以菲, 蔡忠亚, 王强, 等. 胶州湾夏季盐度长期输运机制分析[J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2014, 44 (6): 10-17. (WANG Yifei, CAI Zhongya, WANG Qiang, et al. Investigation to long-term transport mechanism of salinity in Jiaozhou Bay in summer [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 44 (6): 10-17. (in Chinese))
- [30] 英晓明, 丁平兴. 洋山港海域水体和悬沙输运机制研究[J]. *海洋通报*, 2011, 30 (2): 135-141. (YING Xiaoming, DING Pingxing. Research on transport mechanism of water and suspended sediment in the Yangshan Harbor waters [J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30 (2): 135-141. (in Chinese))
- [31] 潘存鸿, 张舒羽, 唐子文. 钱塘江河口水流-河床相互作用及对盐水入侵的影响[J]. *水科学进展*, 2015, 26 (4): 535-542. (PAN Cunhong, ZHANG Shuyu, TANG Ziwen. Interaction of flow-riverbed and its effects on saltwater intrusion in Qiantang River estuary [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26 (4): 535-542. (in Chinese))
- [32] 史英标, 李若华, 姚凯华. 钱塘江河口一维盐度动床预报模型及应用[J]. *水科学进展*, 2015, 26 (2): 212-220. (SHI Yingbiao, LI Ruohua, YAO Kaihua. 1-D movable bed numerical forecast model of salinity of the Qiantang River estuarine reach and its application [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26 (2): 212-220. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-10-15 编辑: 刘晓艳)

