



# 灌河口盐、悬沙通量的分解及时空特征\*

李谊纯<sup>1,2</sup>, 刘金贵<sup>3</sup>

(1. 广西科学院, 广西近海海洋环境科学重点实验室, 广西南宁 530007;  
2. 滁州学院地理信息与旅游学院, 安徽滁州 239000; 3. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

**摘要:** 灌河是江苏省北部目前唯一没有在干流建闸的入海河流, 拥有广阔的滩涂和优良的航运条件。河口通量是河口治理和河口环境保护中的关键要素。为研究灌河口的盐及悬沙的输运, 基于实测资料利用通量分解方法对灌河口的盐及悬沙通量的空间分布、大-小潮与潮内的时间变化特征进行了探讨。研究认为: 在口门以内的弯曲河段, 盐通量在凸岸浅水区一般指向下游, 在凹岸深槽处则指向上游。大、小潮期间悬沙通量则基本上为左侧指向上游、右侧指向下游; 口外盐通量方向为 NNE-NE, 而且随径流量大小而稍有改变, 口外悬沙通量方向在远岸区域表现为 WNW-NNE, 近岸 G2 测点的悬沙通量则指向口门; 口门内外盐和悬沙通量的组成均基本以  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_4$  为主导, 通量组成的总体特征在大、小潮期间基本类似。涨落潮流速最大时刻的悬沙通量不一定与流速方向一致, 最大落潮流速时刻由于悬沙浓度可能小于平均值而导致悬沙净输运指向上游。

**关键词:** 灌河; 通量分解; 悬沙; 盐通量

中图分类号: P 731; U 612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)11-0050-07

## Decomposition of salinity and sediment fluxes and their spatial-temporal characteristics in the Guanhe estuary

LI Yi-chun<sup>1,2</sup>, LIU Jin-gui<sup>3</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Science, Guangxi Academy of Sciences, Nanning 530007, China;

2. College of Geographical Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China;

3. National Oceanic Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The Guanhe River has wide shoals and excellent waterways, which is unique in the north Jiangsu Province that has no dam in its main stream. Estuarine flux is the key parameter in estuarine regulation and environment protection. In order to investigate the transport of salt and suspended sediment, the spatial distribution of salinity and suspended sediment and the temporal variation of spring-neap tide and intra-tide were discussed using a flux decomposition method on the basis of field data. The results show that the fluxes of salinity points to downstream in the shallow zones near the convex bank and to upstream in the channels near concave bank in the curve segments. The suspended sediment fluxes points to upstream near the left bank and to downstream near the right bank during the spring and neap tide. The directions of the flux of salinity are NNE-NE and changes slightly with different river discharge in outer zone. The suspended sediments are transported along WNW-NNE in remote area, while upstream at G2 near the river mouth.  $T_1$ ,  $T_2$  and  $T_4$  are the dominate components of salinity and suspended sediment fluxes, and the characteristics of flux composition is similar between spring and neap tide. The direction of net suspended sediment flux is not always as same as the tidal velocity at maximum ebb or flood. Net upstream flux might be induced at maximum ebb due to sediment concentration is lower than its tidally-averaged value.

**Keywords:** Guanhe River; flux decomposition; suspended sediment; salinity flux

收稿日期: 2016-03-25

\*基金项目: 国家自然科学基金 (41266002)

作者简介: 李谊纯 (1977—), 男, 博士, 工程师, 从事河口动力学研究。

灌河是江苏省北部最大的入海河流, 也是江苏沿海唯一尚未在河口建闸的天然潮汐河道。随着区域经济的发展, 灌河口的研究越来越受到关注。在 20 世纪 80 年代谢金赞对灌河口外水文动力条件进行了重要探讨之后<sup>[1]</sup>, 诸多学者通过资料分析、物理模型或数学模型手段对灌河口的潮流与波浪动力过程、河口演变与沉积特征、航道冲淤与拦门沙整治、河相关系等开展了大量研究<sup>[2-10]</sup>, 灌河口的海洋环境研究也越来越引起学者的兴趣<sup>[11-12]</sup>。河口通量的计算及分解是潮汐河口理论和治理中的重要内容, 它有利于从动力机制上认识河口通量<sup>[13-14]</sup>, 我国的长江口、珠江口等亦有一定的研究<sup>[15-17]</sup>, 但灌河口的相关研究未见报道。鉴于此, 本文基于实测水文泥沙资料对灌河口的盐、悬沙通量进行研究, 以期对灌河口的自然生态维护和口门岸滩发育提供理论依据。

## 1 河口通量的分解

### 1.1 计算方法

水体中盐的潮周期平均的单宽通量  $Q_0$  可表示为:

$$Q_0 = \frac{1}{T} \int_0^T Q dt = \frac{1}{T} \int_0^T h \langle us \rangle dt \quad (1)$$

式中:  $Q$  为时空变化的单宽通量;  $h$  为水深;  $u$  为流速;  $s$  为水体中盐度;  $\langle \rangle$  为垂向平均。若令:

$$u_v = u - \langle u \rangle, s_v = s - \langle s \rangle, \langle s \rangle_0 = \frac{1}{T} \int_0^T \langle s \rangle dt, s_t = \langle s \rangle - \frac{1}{T} \int_0^T \langle s \rangle dt, \text{ 则式(1) 可改写为:}$$

$$Q_0 = \underbrace{h_0 \langle u \rangle_0 \langle s \rangle_0}_{T_1} + \underbrace{h_0 (u_t s_t)_0}_{T_2} + \underbrace{\langle u \rangle_0 (h_t s_t)_0}_{T_3} + \underbrace{\langle s \rangle_0 (h_t u_t)_0}_{T_4} + \underbrace{(h_t u_t s_t)_0}_{T_5} + \underbrace{h_0 (u_v s_v)_0}_{T_6} + \underbrace{(h_t u_v s_v)_0}_{T_7} \quad (2)$$

式中: 下标“0”表示潮周期平均;  $T_1$  为平均流和平均盐度的相互作用;  $T_2$  为时间变化的流速和盐度的相互作用;  $T_3$  为时间变化的水深(潮位)和盐度的相互作用;  $T_4$  为时间变化的流速和水深(潮位)的相互作用;  $T_5$  为时间变化的流速、盐度和水深(潮位)的相互作用;  $T_6$  为河口重力环流的平均

剪切效应;  $T_7$  为潮流的剪切效应和水深(潮位)时间变化的相互作用导致的输运通量。式(2)亦可应用于悬沙通量。

### 1.2 计算方案

图 1 为灌河口潮位和流速测点的分布, 其中 C1~C4 流速点位于灌河口口内小蟒牛附近的凹岸深槽。图 2 为 G5L-G5R 和 G6L-G6 断面的水深(1985 国家高程基准)。在口内的流速测点令指向下游为正, 盐和悬沙只计算垂直于河道横断面的通量。在口外测点, 则将流速分解为沿岸和离岸两个方向分别进行通量计算, 令沿岸方向的 SE( $v$ ) 向和离岸方向 NE( $u$ , 北偏东  $55^\circ$ ) 为正。各流速点的潮位由相邻潮位站的潮位过程按距离内插计算。水文、泥沙数据为 2007-07-29T14:00—2007-07-30T14:00 (大潮) 和 2007-08-06T8:00—2007-08-07T8:00 (小潮) 实测资料, 陈家港至口开山岛附近地形资料为 2007 年 9 月实测。

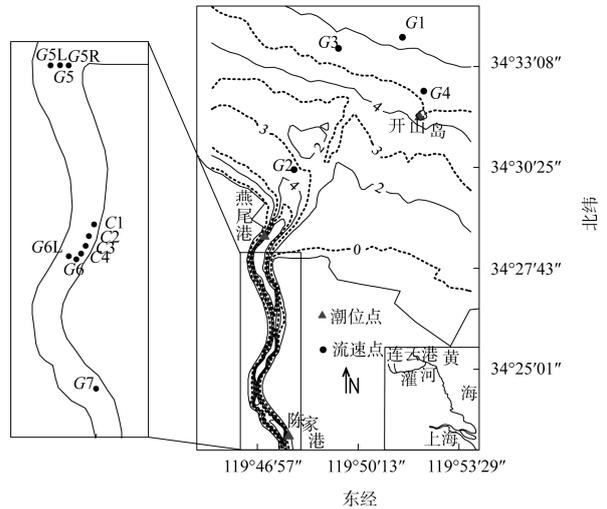


图 1 灌河口基本形势及测点

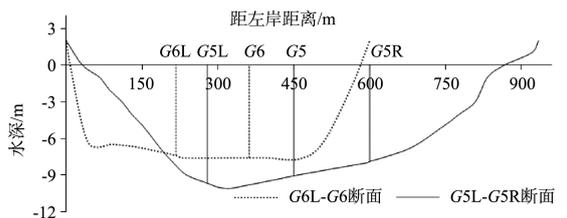


图 2 G5L-G5R 和 G6L-G6 断面的水深

## 2 结果与讨论

### 2.1 盐通量的空间及大、小潮变化

表 1 为灌河口内测点的盐通量, 其中“ $\Sigma$ ”

表示对  $T_1 \sim T_5$  求和。可以看出，口内各点的盐通量的组成中  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_4$  占绝对优势。 $T_1$  的输运方向指向下游， $T_2$  和  $T_4$  主导了向上游方向的盐度输

运。 $T_3$  均指向口外，其量值要小于  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_4$  一个量级。 $T_5$  量值小于主导输运项  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_4$  的 1~2 个量级，其方向未呈现明显规律。

表 1 灌河口内盐通量

kg/(m·s)

大小潮	$T$	$G5L$	$G5R$	$G5$	$G6L$	$G6$	$C1$	$C2$	$C3$	$C4$	$G7$
大潮	$T_1$	8.23	17.83	16.68	5.39	4.21	4.28	4.34	3.48	3.04	2.37
	$T_2$	-8.17	-10.83	0.96	-3.19	-3.04	-3.83	-4.40	-3.95	-4.40	-0.62
	$T_3$	0.80	1.69	1.86	0.65	0.47	0.62	0.63	0.53	0.45	0.31
	$T_4$	-2.98	-3.78	-3.51	-2.29	-2.33	-2.35	-2.18	-2.23	-2.21	-1.14
	$T_5$	-0.52	-0.19	0.68	0.34	0.24	-0.05	-0.14	-0.07	-0.15	0.40
	$\Sigma$	-2.64	4.71	16.68	0.91	-0.45	-1.33	-1.75	-2.23	-3.27	1.31
小潮	$T_1$	7.62	14.32	16.80	5.38	5.56	5.40	5.77	3.52	1.43	3.87
	$T_2$	-4.79	-9.14	-0.59	-3.97	-3.85	-3.75	-5.05	-3.62	-1.35	-0.06
	$T_3$	0.56	1.03	1.35	0.50	0.55	0.59	0.63	0.41	0.16	0.46
	$T_4$	-2.69	-4.07	-3.75	-2.56	-2.53	-2.32	-2.36	-2.10	-2.05	-1.20
	$T_5$	-0.39	0.06	0.39	0.53	0.18	0.15	-0.15	-0.02	0.29	0.30
	$\Sigma$	0.31	2.21	14.20	-0.11	-0.10	0.06	-1.16	-1.81	-1.52	3.36

大潮期间  $G5L$ - $G5R$  断面上  $G5L$ 、 $G5$  和  $G5R$  测点的盐通量分别为 -2.64、4.71、16.68 kg/(m·s)，表明在灌河口门处，盐在右侧凸岸浅水区域向外海输运；而在凹岸深槽处指向上游。 $G6L$ - $G6$  断面的  $G6L$  和  $G6$  测点也呈现不同的输运方向，左侧向下游输运，右侧则指向上游。在  $C1 \sim C4$  所在的小蟒牛附近的凹岸深槽处，盐通量均为负值，说明该处盐亦在凸岸浅水区域向下游输运。小潮期间， $G5L$ - $G5R$  断面上测点的盐通量均指向口外，但存在着明显的横向差异，凸岸的浅水区是其主要的通道。 $G6L$  和  $G6$  点情况与大潮时不同，均表现为较小的指向上游的盐通量。由图 2 可以看出， $G6L$ - $G6$  断面为典型的“U”型断面， $G6L$  和  $G6$  主要代表断面的中间部分，因此可以推断，在该断面的两侧较浅的区域，盐通量应是指向下游。在小蟒牛深槽区域的  $C1 \sim C4$  测点与大潮期间的总体趋势基本一致。

表 2 为灌河口外测点的盐通量。大潮期间，在远岸的  $G1$ 、 $G3$  和  $G4$  测点，垂岸方向上的盐通量组成中  $T_4$  显著大于其他各项，其最大可超过总通量的 95% ( $G1$  测点)，其次为  $T_1$  和  $T_2$ ；在近岸的  $G2$  测点， $T_2$  最大，约为  $T_1$  和  $T_4$  二者的和，这说明盐度输运的动力机制随着离岸距离的变化而存在本质的改变。在沿岸方向上，盐通量的组成

表 2 灌河口外盐通量

kg/(m·s)

大小潮	方向	$T$	$G1$	$G2$	$G3$	$G4$
大潮	垂岸方向	$T_1$	-1.0	3.2	3.3	7.8
		$T_2$	1.6	6.1	3.7	2.6
		$T_3$	0.0	0.6	0.0	0.1
		$T_4$	14.5	3.0	15.0	13.2
		$T_5$	0.1	0.2	-0.3	0.0
		$\Sigma$	15.2	13.1	21.9	23.6
	沿岸方向	$T_1$	-4.5	5.2	-2.5	1.4
		$T_2$	-3.0	-7.4	-3.0	-1.9
		$T_3$	0.0	1.0	0.0	0.0
		$T_4$	-2.2	-1.6	0.2	-0.5
		$T_5$	0.2	-0.4	0.2	0.0
		$\Sigma$	-9.6	-3.3	-5.1	-1.0
小潮	垂岸方向	$T_1$	-2.4	6.7	5.3	7.6
		$T_2$	2.1	5.8	2.9	2.9
		$T_3$	0.0	1.1	0.0	0.1
		$T_4$	9.6	3.3	11.7	9.8
		$T_5$	-0.2	-0.4	-0.2	0.0
		$\Sigma$	9.1	16.4	19.9	20.4
	沿岸方向	$T_1$	-10.2	4.4	-2.1	-0.2
		$T_2$	-2.0	-6.1	-1.3	-1.3
		$T_3$	-0.1	0.7	0.0	0.0
		$T_4$	-5.8	-6.0	-3.4	-3.2
		$T_5$	0.0	0.1	0.0	0.0
		$\Sigma$	-18.0	-6.9	-6.8	-4.7

以  $T_1$  和  $T_2$  为主，但通量组成成分的量值在各测点间存在一定的差异。在近岸的  $G2$  测点， $T_1$  为正值，表明径流来水对该处的盐度输运尚有明显的

影响。由表 2 还可以看出, 在大潮期间, 沿岸方向上的  $T_2$  近似代表了该方向上总的盐通量, 二者量级相同、方向一致。小潮期间, 各测点在垂岸方向上的盐通量的组成与大潮期间基本一致。

从盐通量的方向上来看, 垂岸方向上为向海输运, 沿岸方向上指向 NW 方向。大潮期间  $G1 \sim G4$  测点总盐通量方向分别约为  $23^\circ$ 、 $41^\circ$ 、 $42^\circ$ 、 $53^\circ$ , 小潮期间分别为  $352^\circ$ 、 $32^\circ$ 、 $36^\circ$ 、 $42^\circ$ 。可以看出, 相对于大潮期间, 小潮时段的盐度净输运的方向有明显的逆时针旋转。本次测量期间大、小潮的潮差变化相对较小, 因此盐度净输运的这种方向的改变可能是径流量在小潮期间减少的反映。

## 2.2 悬沙通量的空间及大、小潮变化

由表 3 可知, 大潮期间  $G5L-G5R$  断面测点的  $T_1$  项均为正值, 这反映了余流所代表的恒定输运, 左侧深槽处小于右侧浅水区域;  $T_2$  的特征与  $T_1$  相反, 均为负值且量值在深槽处较大。 $T_4$  在  $G5L$ 、 $G5$  和  $G5R$  测点均为负值, 表明悬沙通量中的该组成成分指向上游。较之盐通量, 悬沙通量的组成中  $T_5$  的量值相对其他主导项呈现明显增大。总

悬沙通量在  $G5L$  指向上游, 在  $G5$  和  $G5R$  指向口外。表明悬沙在  $G5L-G5R$  断面的左侧深槽处为向上游的净输运, 在水深较浅的区域为向海输运。在  $G6L-G6$  断面, 悬沙通量的各组成以  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_4$  和  $T_5$  为主导,  $G6L$  点和  $G6$  点的  $T_2$  分别指向上游和下游。二者各自总悬沙通量亦呈现与  $T_2$  类似的不同方向。 $C_1 \sim C_4$  测点的悬沙通量的特征基本一致: 除  $T_3$  量值明显小外, 其他各通量组成均处于同一数量级, 总悬沙通量均为正值; 表明该处为悬沙下泄的通道。对比  $G5L-G5R$  断面和  $G6L-G6$  断面, 推测  $C_1 \sim C_4$  测点所在断面悬沙在凹岸深槽处下泄, 可能在凸岸浅滩处上溯。陈家港附近的  $G7$  测点,  $T_1$  和  $T_3$  项为正, 其他诸项为负, 总悬沙通量为  $-31.4 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ , 表明对悬沙输运而言, 在陈家港附近潮流仍具有非常明显的作用。小潮期间, 灌河口内各测点的悬沙通量及其组成的基本特征与大潮期间几乎完全一致。值得指出的是, 在表 3 中各测点大、小潮的悬沙通量除大潮期间的  $G5L$ 、 $G5$  和  $G5R$  以外, 均呈现  $T_2$  可近似代表各点总悬沙通量, 二者量值相当、方向相同的特征。

表 3 灌河口内悬沙通量

		kg/(m·s)									
大小潮	$T$	$G5L$	$G5R$	$G5$	$G6L$	$G6$	$C1$	$C2$	$C3$	$C4$	$G7$
大潮	$T_1$	43.4	104.2	103.6	51.2	47.2	43.9	52.0	43.0	38.0	66.3
	$T_2$	-65.6	-36.4	-4.5	-54.0	64.6	30.0	67.8	55.1	19.7	-55.0
	$T_3$	0.8	-0.2	-0.6	1.7	-0.7	0.2	-1.2	-1.1	0.7	3.4
	$T_4$	-15.7	-22.1	-21.8	-21.7	-26.2	-24.1	-26.1	-27.5	-27.7	-31.9
	$T_5$	-9.6	-7.9	-7.9	-10.6	-10.7	-12.3	-13.9	-10.5	-8.3	-14.1
	$\Sigma$	-46.7	37.5	68.9	-33.4	74.2	37.7	78.5	58.9	22.5	-31.4
小潮	$T_1$	50.0	112.2	184.4	96.4	94.1	60.0	9.9	54.5	25.2	122.7
	$T_2$	-48.2	22.0	159.7	-63.1	145.8	9.2	32.2	75.6	94.5	-118.3
	$T_3$	0.4	-2.7	-13.5	2.5	-2.6	0.5	-0.8	-0.3	0.8	8.9
	$T_4$	-17.6	-31.8	-41.2	-45.8	-42.8	-25.8	-36.7	-32.5	-36.1	-38.2
	$T_5$	-13.0	-11.6	-13.9	-20.0	-19.8	-11.8	-14.6	-12.4	-4.5	-20.5
	$\Sigma$	-28.5	88.1	275.6	-29.9	174.7	32.1	69.9	84.9	79.9	-45.3

表 4 为灌河口外各测点的悬沙通量。大潮期间在垂岸方向上, 近岸的  $G2$  测点各通量组成成分均明显大于其他远岸诸点, 这应是由于近岸处悬沙浓度大于远岸所致。 $G1$  和  $G4$  测点的总悬沙通量在垂岸方向上表现为向海,  $G3$  测点则为量值相

对较小的向岸输运。从通量的组成来看, 垂岸方向上仍基本以  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_4$  为主。在沿岸方向上,  $G2$  测点的各通量组成亦均明显大于其他远岸诸点, 总通量指向 SE, 远岸的  $G1$ 、 $G3$  和  $G4$  指向 WNW-NNE。远岸的  $G3$ 、 $G4$  测点悬沙通量主要由

$T_1$ 和 $T_2$ 主导; $T_3$ 、 $T_4$ 在通量构成中贡献微小。大潮期间口外各测点总悬沙通量的方向分别约为: $37^\circ$ 、 $158^\circ$ 、 $286^\circ$ 和 $32^\circ$ 。

表4 灌河口外悬沙通量  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$

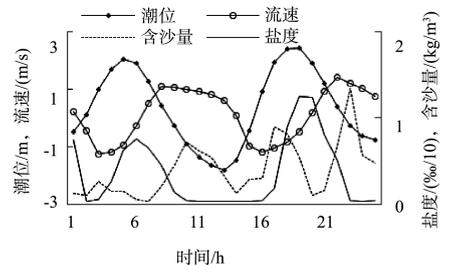
大小潮	方向	$T$	$G1$	$G2$	$G3$	$G4$
大潮	垂岸方向	$T_1$	-2.8	80.6	6.8	10.2
		$T_2$	13.6	-190.5	-44.9	10.1
		$T_3$	-0.1	-14.6	-0.5	0.3
		$T_4$	41.2	75.4	30.8	17.3
		$T_5$	0.9	-10.1	1.0	2.8
		$\Sigma$	52.8	-59.2	-6.8	40.6
	沿岸方向	$T_1$	-12.7	131.5	-5.1	1.8
		$T_2$	-2.4	185.2	-9.4	-18.4
		$T_3$	-0.4	-23.8	0.4	0.1
		$T_4$	-6.3	-40.4	0.4	-0.6
		$T_5$	4.6	-2.3	5.1	0.1
		$\Sigma$	-17.2	250.3	-8.4	-17.2
小潮	垂岸方向	$T_1$	-2.7	203.6	9.9	6.7
		$T_2$	-13.2	-112.4	17.4	-1.5
		$T_3$	-0.1	-14.7	0.3	0.0
		$T_4$	10.7	98.7	21.8	8.6
		$T_5$	-1.7	47.2	-0.2	0.1
		$\Sigma$	-6.9	222.3	49.2	14.1
	沿岸方向	$T_1$	-11.5	134.1	-3.9	-0.1
		$T_2$	-20.0	233.2	-16.8	-6.5
		$T_3$	-0.3	-9.7	-0.1	0.0
		$T_4$	-6.5	-182.9	-6.4	-2.8
		$T_5$	0.7	-59.4	1.7	0.4
		$\Sigma$	-37.6	115.3	-25.5	-9.0

小潮期间在垂岸和沿岸方向上 $G2$ 测点的悬沙通量均为正值。 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_4$ 和 $T_5$ 的量值均比较大。远岸的3个测点 $G1$ 、 $G3$ 和 $G4$ 的悬沙通量的组成均以 $T_1$ 、 $T_2$ 和 $T_4$ 为主。小潮期间口外各测点总悬沙通量的方向分别为: $315^\circ$ 、 $208^\circ$ 、 $28^\circ$ 、 $22^\circ$ 。可以看出,口外悬沙通量方向相对大潮期间具有明显的变化,但其规律性不如盐通量。总悬沙通量的方向在远岸区域仍表现为WNW-NNE,近岸 $G2$ 测点的悬沙通量指向口门。此外,与口内相似,在口外潮流涨落的主方向(沿岸)上,悬沙通量的组成中亦表现为 $T_2$ 与总悬沙通量量值相当、方向相同的特征。

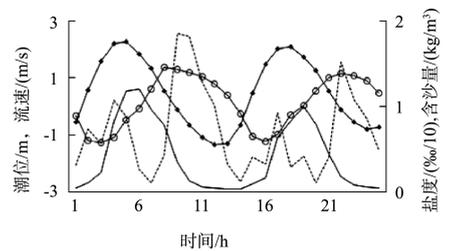
### 2.3 盐、悬沙通量的潮周期变化

图3为灌河口内 $G6$ 测点和口外近岸的 $G2$ 测

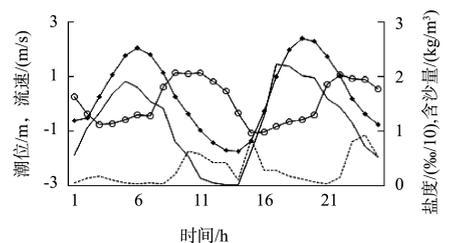
点的潮位、流速、盐度和悬沙在大、小潮期的过程线。可以看出,在口内的 $G6$ 测点,最大涨(落)潮流速在大、小潮期间均出现在最高(低)潮位后3h左右。在口外的 $G2$ 测点,最大涨潮流速出现在最高潮位前2h左右;最大落潮流速出现在最低潮位前约3h。由此可见,灌河口门附近潮波兼有驻波和行进波的特征,但总体而言更接近驻波。在 $G6$ 测点盐度最大值约出现在最高潮位后1h。 $G2$ 点由于位于口门以外,盐度呈现出近似正(余)弦曲线的时间变化特征,盐度过程与潮位过程基本同步。由图3亦可以看出,含沙量在大、小潮期间均表现出随着流速增减而增减的基本特征,但并未呈现出明显的周期性。含沙量在潮周期内的变化较盐度更为复杂,这是泥沙运动机制更复杂所致。潮位、流速、盐度和含沙量复杂的潮周期内变化及相互之间相位差关系导致了通量中各组成在潮周期内的变化。通量组成的潮周期变化可为河口治理提供一定的参考。



a)  $G6$ 大潮



b)  $G6$ 小潮



c)  $G2$ 大潮

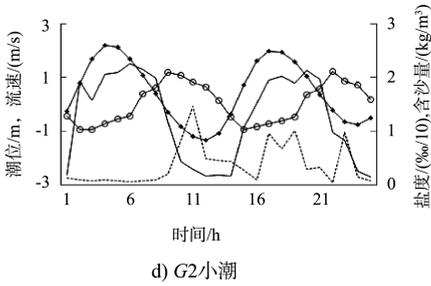


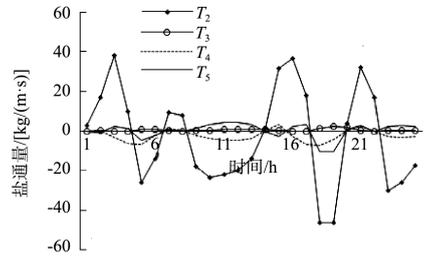
图 3 G6、G2 测点的潮位、流速、盐度和含沙量

图 4、5 分别为大潮期间盐度和含沙量通量组成中  $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  和  $T_5$  随时间的变化过程(小潮期间特征基本一致, 未列出), 其中  $T_2$  的变化幅度最大, 这一特点在悬沙通量及 G6 测点的盐通量体现尤为突出。

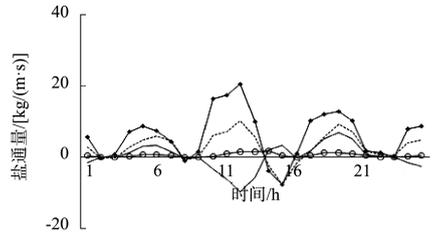
由图 4 还可看出, G6 的  $T_2$  项在 25 h 的过程中均存在明显的 8 个极值, 分别出现在流速或盐度极值的发生时刻附近。在口外 G2 测点的沿岸方向上亦基本表现出与 G6 测点一致的时间变化特征;  $T_2$  项的变化幅度最大;  $T_4$  和  $T_5$  的量值及其变幅相当, 二者在涨潮流时段方向相反, 近似抵消, 落潮流时段方向相同。G2 测点垂岸方向上盐通量的各组成的时间变化与涨落潮流主方向(沿岸)上类似, 但方向相反。图 5 中的悬沙通量的时间变化亦基本呈现了与盐通量相同的特征, 其中,  $T_2$  项对悬沙通量具有主导性的贡献。由于含沙量过程的复杂性, 虽然趋势不明显, 但  $T_2$  项的极值基本上出现在与盐通量极值相应的时间。由图 5 亦可看出在潮流涨落的主方向(沿岸)上,  $T_2$  项体现了总悬沙通量的基本特征。

若令  $A = A_0 \cos(\omega t)$ 、 $B = B_0 \cos(\omega t - \Delta\varphi)$  分别为流速和含沙量(或盐度), 其中  $A_0$ 、 $B_0$  分别为振幅,  $\omega$  为频率,  $t$  为时间,  $\Delta\varphi$  为相位差, 结合式(2), 则有:

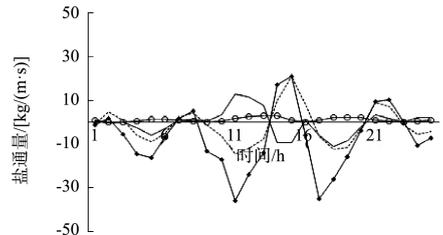
$$T'_2 = T_2(t) / h_0 = AB = \frac{1}{2} A_0 B_0 \cos(2\omega t - \Delta\varphi) + \frac{1}{2} A_0 B_0 \cos(\Delta\varphi) \quad (3)$$



a) G6

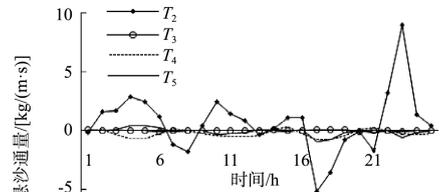


b) G2垂岸方向

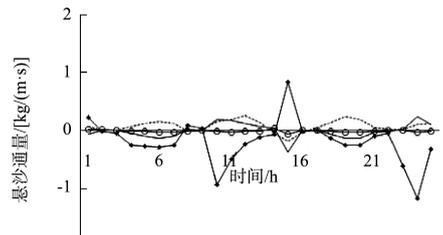


c) G2沿岸方向

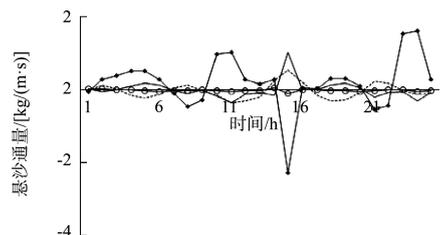
图 4 大潮期间 G6、G2 测点的盐通量组成



a) G6



b) G2垂岸方向



c) G2沿岸方向

图 5 大潮期间 G6、G2 测点的悬沙通量组成

其中,  $T_2'$ 为时间变化的流速和含沙量的相互作用。由式(3)可以看出,  $T_2'$ 包含的频率为潮流和含沙量(或盐度)频率和的成分, 其极值既不出现在最大涨落潮流速的时刻也不在最大含沙量(或盐度)出现的时刻。此外, 通量的极值并不一定与流速方向一致, 如图4中G6和G2沿岸方向上的第10h和第23h附近、图5中G6和G2沿岸方向上的第8h和第21h附近, 此时落潮流速均接近最大值, 但通量的方向却显示为指向上游或口内。朱国臣等<sup>[5]</sup>曾提出河口整治建筑的高程宜采用最大落潮流速时的平均潮位, 以集中落潮水流冲刷航道。但由前述分析可知, 落潮流速最大时悬沙通量不一定与流速方向一致, 这是因为在最大流速发生时刻, 含沙量可能仍低于潮周期的平均值, 此时的悬沙通量对悬沙净输运的贡献为负, 因此从理论上可认为, 灌河口整治建筑采用的高程可能宜为最大落潮流速后, 至其后相邻的最大悬沙量时刻之间悬沙通量指向外海的某一时刻的平均潮位。

### 3 结语

1) 口内的弯道深水区域盐度输运指向上游, 在浅水区域盐通量指向下游。口门内外盐通量的组成均以  $T_1$ 、 $T_2$ 和  $T_4$ 为主导。各测点盐通量组成的总体特征在大、小潮期间基本类似。悬沙在口门附近弯曲河段的深槽处为向上游净输运, 浅水区域为向海的悬沙输运的通道; 在位于弯曲河道过渡段的G6L-G6断面上, 大、小潮期间悬沙通量均为左侧指向上游、右侧指向下游。

2) 口外大潮期间盐度净输运方向为NNE-NE, 小潮期间为N-NE。口门内外盐通量的组成均以  $T_1$ 、 $T_2$ 和  $T_4$ 为主导, 但随空间位置的不同, 各通量组成成分对总的盐通量的贡献存在量值的差异。口外悬沙通量的组成亦基本以  $T_1$ 、 $T_2$ 和  $T_4$ 为主, 但总悬沙通量的方向在大、小潮期间具有明显的变化但规律性不及盐通量。总悬沙通量的方向在远岸区域仍表现为WNW-NNE, 近岸G2测点的悬沙通量则指向口门。盐和悬沙净输运的方向随径流量大小有所改变。

3) 灌河口涨、落潮流速最大时悬沙通量不一定与流速方向一致。

### 参考文献:

- [1] 谢金赞.灌河口外水文动力条件分析[J].河海大学学报, 1987, 15(5): 12-20.
- [2] 张东生, 谢金赞, 郑小平.灌河口沿岸流场的数值模拟[J].海洋与湖沼, 1988, 19(4): 380-390.
- [3] 张东生, 蒋勤.江苏北部灌河口悬沙输运数学模型[J].海洋学报, 1991, 13(1): 125-136.
- [4] 张东生, 张长宽.灌河口沙嘴成因分析及治理研究[J].河海大学学报, 1993, 21(4): 29-37.
- [5] 李国臣, 徐金环.灌河口外拦门沙航道整治探讨[J].泥沙研究, 1993(4): 72-80.
- [6] 肖玉仲, 刘国贤, 杜瑞芝, 等.江苏灌河口现代沉积速率的研究[J].海洋学报, 1997(5): 91-96.
- [7] 高晨晨, 陈国平, 尹亚军.响水海域双峰谱型海浪的统计分析[J].水运工程, 2016(3): 23-28.
- [8] 张玮, 周凯.灌河口双导堤整治工程对岸滩演变的影响分析[J].水运工程, 2009(10): 41-46.
- [9] 张世钊, 夏云峰, 徐华.灌河口外航道整治模型试验研究[J].海洋工程, 2014, 32(5): 40-49.
- [10] 张玮, 曹昊.灌河河相关系及航道整治设想[J].水道港口, 2015, 36(1): 40-45.
- [11] 田爱军, 李冰, 屈健.江苏省灌河流域污染特征及污染控制对策[J].湖泊科学, 2012, 24(4): 535-540.
- [12] 黄家祥, 殷勇, 徐军, 等.苏北灌河口潮间带表层沉积物重金属空间分布特征及其环境效应[J].海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(5): 23-32.
- [13] Fischer H B, List E J, Koh R C Y, et al. Mixing in Inland and Coastal Waters[M]. USA: Academic Press, 1979: 483.
- [14] Chua P V. Modeling the variations of freshwater inflows and tidal mixing on estuarine circulation and salt flux[J]. Journal of Coastal Research, 2013, 29(6): 1 391-1 399.
- [15] 茅志昌, 沈焕庭, 陈景山.长江口北支进入南支净盐通量的观测与计算[J].海洋与湖沼, 2004, 35(1): 30-34.
- [16] 汪亚平, 潘少明, Wang H V.长江口水沙入海通量的观测与分析[J].地理学报, 2006, 61(1): 35-46.
- [17] Gong W P, Ma P Y, Hong B. Salt transport during a dry season in the Modaomen Estuary, Pearl River Delta[J]. China, Ocean & Coastal Management, 2014, 100: 139-150.