

博贺湾海域悬沙输移机制分析

樊立东,童朝锋,孟艳秋

(河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:根据博贺湾海域大潮期间的水文泥沙实测资料,采用悬沙通量机制分解法将悬沙净输移通量分解为多个动力项,并分别从平流输沙、潮泵输沙和垂向净环流输沙三方面分析了悬沙输移机制。结果表明:博贺湾海域大潮期间拉格朗日余流基本沿涨潮方向,离岸越远,余流值越大,欧拉余流大小与拉格朗日余流相近,斯托克斯余流接近于零;平流输沙在悬沙净输移中占主导作用,其中欧拉余流输沙作用方向与涨落潮优势流相关;博贺湾海域潮泵效应输沙作用不强,潮泵作用由涨落潮潮流和含沙量在潮周期的不对称性引起;垂向余环流输沙作用很弱,垂向净环流输沙和拉格朗日余流和含沙量的垂向分布有关。

关键词:悬沙输移;余流;平流输沙;潮泵效应;垂向净环流;博贺湾

中图分类号:TV148⁺.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)06-0058-06

Analyses of mechanism of suspended sediment transport in Bohe Bay//FAN Lidong, TONG Chaofeng, MENG Yanqiu (College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to measured hydrological and suspended sediment data from spring tides in Bohe Bay, the suspended sediment transport flux was divided into several dynamic items using the mechanism decomposition method, and the mechanism of suspended sediment transport was analyzed in terms of the advection sediment transport, tidal pumping effect, and vertical circulation transport. The results show that the Lagrangian residual current basically moves in the direction of the flood tide and its value increases with the distance from the shore. The Euler residual current has a value similar to the Lagrangian residual current, while the value of the Stokes residual current is close to zero. The advection is the leading factor affecting the suspended sediment transport and the transport effect of the Euler residual current is correlated with preferential flow in the tidal process. The tidal pumping effect in Bohe Bay does not have a strong influence on the suspended sediment transport, and it is induced by the asymmetry of the tidal current and suspended sediment concentration. The vertical residual circulation has a weak effect on the suspended sediment transport and is related to the vertical distributions of the Lagrange residual current and suspended sediment concentration.

Key words: suspended sediment transport; residual current; advection sediment transport; tidal pumping effect; vertical circulation; Bohe Bay

海湾泥沙输移过程涉及非常复杂的物理机制,影响因素包括潮汐、波浪、风场、水团流系、岸滩地形及泥沙来源等^[1-3]。悬沙通量机制分解法是将悬沙通量分解成多个动力项,再对各项内影响输沙的动力因素进行计算、比较和分析的一种悬沙输移分析方法^[4],早在 20 世纪六七十年代,Bowden 等^[5-7]先后提出并发展了悬沙输移公式,分析了河口区悬沙输移特征。到 20 世纪 90 年代之后,悬沙通量机制分解法进一步发展并得到广泛运用:陈子燊^[8]利用珠江伶仃洋河口与内陆架的流速、含沙量等资料,运用悬沙通量机制分解法,分析得到净平流是悬沙输运的主要动力因素;任杰等^[9]将悬沙总输移分解为 8 个分量,结合低通滤波技术,发现平流、潮汐捕集和垂向净环流是悬沙输移的主要动力;Talke 等^[10]将流速与悬沙浓度分解为潮汐项、风浪项、波动项和潮周期项,分析了旧金山海湾潮间带的悬沙输移特征;杨晓东等^[11]根据乐清湾大小潮期间实测水文泥沙资料,将悬沙输移项分解为平流输移项、潮泵输移项和垂向环流输移项,发现潮泵输沙在乐清湾贡献较大,平流输沙项在开阔水域和中湾深槽起控制作用,垂向净环流输沙作用在小潮外湾浅滩、中湾和内湾贡献较大;刘运令等^[12]根据南海辐射沙脊群西洋

基金项目:国家自然科学基金(51339005);国家自然科学基金青年基金(51409094)

作者简介:樊立东(1992—),男,硕士研究生,主要从事河口海岸动力学研究。E-mail:fanlidong0203@163.com

通信作者:童朝锋(1973—),男,副教授,博士,主要从事河口海岸动力学研究。E-mail:tongchaofeng@126.com

水道大潮条件下的实测数据,利用悬沙通量机制分解法,分析了西洋水道的水和悬沙通量。

博贺湾是一个典型的半开敞式的沙坝潟湖,湾内外动力条件复杂,悬沙也呈现出复杂的输移规律,如何准确分析该地区的输沙机制,在潟湖的演变、博贺港区建设和航道维护等工程方面都具有重要的实际意义和理论价值。已有许多学者^[13-15]对博贺湾海域的潮流特征、悬沙浓度分布特征和悬沙输运特征进行了研究,但对悬沙输运机制研究较少,本文根据博贺湾附近海域各测站水沙实测资料,运用悬沙通量机制分解法,从平流输沙、潮泵输沙、垂向净环流输沙三方面对悬沙输移机制进行分析。

1 区域概况及资料来源

博贺湾海域位于广东茂名市电白区的东南面,是由东阁岭、莲头岭半岛及大、小放鸡岛等延伸岛礁围成的半开敞式海湾。博贺湾海域主要是沙坝潟湖地貌,在该海域的东北区域,以博贺港为界,以北是内潟湖,以南是由莲头岭沙嘴围成的外潟湖。博贺港为广东省著名的渔港,博贺湾东岸线为正在开发的博贺新港区。博贺港潟湖的湾口朝向东南,有麻港河等多条小河汇入,挟沙量较大,潟湖的沙嘴在博贺港的西南侧,潟湖开口较宽,约为 3.5 km^[16]。博贺湾海域的湾口位于水东港外航道,水东港有径流汇入并携带较高浓度的泥沙,在湾中处通过大、小放鸡岛等岛礁之间的潮汐通道与湾外海域存在着水流泥沙交换,湾内泥沙滩涂广阔。研究区域包括博贺湾海域的湾内和湾外,东西长约 34 km,南北宽约 24 km。根据水文资料统计分析,研究海域潮动力较弱,潮流属于不规则半日潮,其中 M2 分潮起控制作

用,潮流为略带旋转的往复流,海区涨潮历时普遍大于落潮历时,涨潮平均流速一般大于落潮平均流速。波浪主要是以风浪为主的混合浪,常浪向为东南东向,强浪向为南东向。海区水体含沙量很小,底质均由砂、粉砂和黏土组成。海域泥沙主要来源于径流下泄、岸滩侵蚀和涨潮流携带的泥沙。

采用 2004 年 10 月 30—31 日的大潮期间、在研究区域布设的 8 个流速悬沙测站测得的水文资料,研究区域地形、测站位置见图 1,图中等值线为地形等高线,采用 1985 国家高程基准;各测站水深及流速特征值见表 1。1 号测站位于博贺湾海域的湾口处,2 号测站位于博贺湾海域的湾中,3 号测站位于博贺湾海域湾顶的潮汐通道处,4 号测站位于小放鸡岛与莲头岭之间,5 号、6 号测站位于博贺湾外莲头岭的东南方向,7 号、8 号测站位于湾外较远处。采用 DEM6 型手持式风速风向仪在 1 号、3 号、6 号、7 号测站从开始测次起每隔 1h 观测风速风向。1 ~ 8 号测站采用常规的 ZSX-3 型流速流向仪按 6 点法测量流速流向,包括水面、0.2H(H 为水深)、0.4H、0.6H、0.8H、水底,每 1 h 观测 1 次流速流向,并在涨憩、落急、落憩、涨急时段 0.5h 加密观测 1 次。各测站每 1h 用横式采样器采取 500 mL 水样用于悬移质含沙量分析。采样的点位与测速点位相同,运用 6 点法对水面、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H、水底与流速同步测验。

根据测得的资料,水文资料测量期间平均风速为 4.4 m/s,风向介于北-南南东之间,其中东南向频率最大,占 35.3%,东向次之,占 28.0%。1 号测站涨落潮流速都很小,涨潮主流向为西北向,落潮受径流影响明显,主流向为南向;2 号、4 号测站水深相

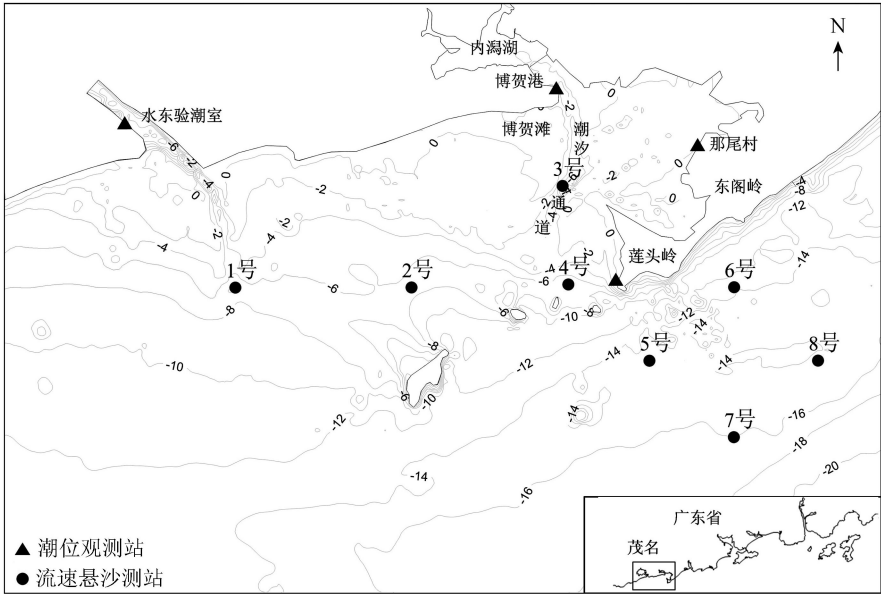


图 1 研究区域地形和测站位置

表 1 各测站水深及流速特征值

测站	潮平均水深/m	涨潮最大流速		涨潮平均流速		落潮最大流速		落潮平均流速	
		大小/(m·s ⁻¹)	流向/(°)	大小/(m·s ⁻¹)	流向/(°)	大小/(m·s ⁻¹)	流向/(°)	大小/(m·s ⁻¹)	流向/(°)
1 号	10.58	0.22	297	0.17	272	0.28	180	0.15	140
2 号	9.10	0.27	298	0.19	299	0.36	136	0.19	150
3 号	9.62	0.82	37	0.50	38	0.81	236	0.42	218
4 号	8.44	0.40	321	0.24	303	0.42	138	0.22	151
5 号	16.39	0.34	265	0.20	254	0.32	74	0.21	78
6 号	14.02	0.29	239	0.12	231	0.16	58	0.11	81
7 号	16.27	0.48	257	0.24	256	0.26	93	0.16	117
8 号	14.89	0.37	258	0.20	257	0.19	102	0.13	117

近,且夹在莲头岭和大放鸡岛的中间,涨潮流向为西北向,落潮流向为东南向;3 号测站位于博贺湾海域的湾顶处,受地形束窄作用,涨落潮流速很大,涨潮流指向东北,落潮流指向西南;5 号、6 号测站受海岸地形影响,涨潮主流向为西偏南,落潮主流向为东稍偏北,落潮流由于受莲头岭的遮挡,在 8 个测站中最小;7 号、8 号测站位于湾外离岸较远,受海岸影响很小,流速较大,涨潮主流向与 5 号、6 号测站相近,但落潮主流指向东偏南。博贺湾海域悬沙中值粒径在 0.006~0.037 mm 之间,属于细颗粒泥沙,悬沙输移动力主要以潮流和余流为主。

2 输沙机制分析方法

采用悬沙通量机制分解法^[17],瞬时流速 $\boldsymbol{u}$ 可以分解为垂向平均量 $\bar{\boldsymbol{u}}$ 和其偏差项 $\boldsymbol{u}'$ 之和, $\bar{\boldsymbol{u}}$ 又可以分解为潮周期平均值 $\langle \bar{\boldsymbol{u}} \rangle$ 与潮周期震荡项 $\boldsymbol{u}_l$ 之和,即:

$$\boldsymbol{u} = \bar{\boldsymbol{u}} + \boldsymbol{u}' = \langle \bar{\boldsymbol{u}} \rangle + \boldsymbol{u}_l + \boldsymbol{u}' \quad (1)$$

同理,悬沙浓度可分解为

$$c = \langle \bar{c} \rangle + c_l + c' \quad (2)$$

水深可分解为潮周期平均值及潮周期震荡项之和:

$$H = \langle H \rangle + H_l \quad (3)$$

拉格朗日余流是指在一个或多个潮周期内流体微团随体速度的平均值,通常由下式计算得到:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{u}_L = \frac{\boldsymbol{Q}}{\langle H \rangle} &= \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \int_0^l \boldsymbol{u} H \mathrm{d} z \mathrm{d} t}{\frac{1}{T} \int_0^T H \mathrm{d} t} = \\ &\langle \bar{\boldsymbol{u}} \rangle + \frac{\langle H_l \boldsymbol{u}_l \rangle}{\langle H \rangle} = \boldsymbol{u}_E + \boldsymbol{u}_S \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{u}_E$ 为垂向平均欧拉余流,它是去除周期性天文潮后的非周期流动,通常受风海流、密度流、径流和潮汐余流等影响; $\boldsymbol{u}_S$ 为斯托克斯余流,直接反映水位变化量和水流变化量的相关性,主要由水波的非线性引起。

根据瞬时流速、含沙量和水深的分解方法,潮周

期平均单宽悬沙输移量可表示为^[18]

$$\begin{aligned} \langle \boldsymbol{F} \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T \boldsymbol{u} c H \mathrm{d} z \mathrm{d} t = \langle H \bar{\boldsymbol{u}} c \rangle = \langle H \rangle \langle \bar{\boldsymbol{u}} \rangle \langle \bar{c} \rangle + \\ &\langle H_l \boldsymbol{u}_l \rangle \langle \bar{c} \rangle + \langle H_l c_l \rangle \langle \bar{\boldsymbol{u}} \rangle + \langle H_l \boldsymbol{u}_l c_l \rangle + \langle H \rangle \langle \boldsymbol{u}_l c_l \rangle + \\ &\langle H \rangle \langle \bar{\boldsymbol{u}}' c' \rangle + \langle H_l \bar{\boldsymbol{u}}' c' \rangle = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 \end{aligned} \quad (5)$$

式中: T_1 为欧拉余流输移项, T_1 的方向取决于涨落潮的优势流对比; T_2 为斯托克斯余流输移项,反映了斯托克斯漂流效应对单宽输沙的贡献; T_1 和 T_2 共同组成了平流输移项,即拉格朗日输移,其方向与拉格朗日余流方向一致; T_3 、 T_4 、 T_5 均含有 c_l ,即与垂线平均含沙量的潮变化项相关,反映了悬沙输移量与水体和底部泥沙之间的双向交换有一定联系,因此, $T_3+T_4+T_5$ 称为潮泵输移项; T_6 、 T_7 为与垂向流速变化相关的项, T_6+T_7 称为垂向净环流输移项。

3 悬沙输移结果与分析

主流向是指涨落潮急流时刻的垂线平均方向,通常以涨潮主流向为正向。由表 1 可知,1~8 号测站涨潮主流向分别为 297°、298°、37°、321°、265°、239°、257°和 258°,垂主流向的方向为横向,将悬沙输移通量分解到主流向和横向上进行分析。表 2 给出了各测站余流值和方向,表 3 给出了各站悬沙输移通量分解结果,表 4 则给出了各站悬沙输移大小及方向。

从表 2 可以看出,位于博贺湾海域湾外的 4~8 号测站的欧拉余流方向与涨潮主流向基本一致,湾内近岸的 1 号、2 号、3 号测站的欧拉余流也基本沿涨潮方向,但受到各自下泄径流的影响,与涨潮主流向有一定偏差,说明在博贺湾海域涨潮流是优势流。距岸线越远的测站拉格朗日余流值越大,各站拉格朗日余流和欧拉余流的数值接近,方向一致,说明拉格朗日余流中欧拉余流占主导。斯托克斯余流的量值比欧拉余流小了 1 个数量级,方向无明显的规律。

由表 4 可知,悬沙净输移中,博贺湾海域湾外离岸较远的 7 号、8 号测站悬沙净输移量最大,随着与岸线距离的缩短,输沙量逐渐减少,但在湾顶的 3 号

表2 各测站余流值和方向

测站	u_L		u_E		u_S	
	大小/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	方向/ ($^{\circ}$)	大小/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	方向/ ($^{\circ}$)	大小/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	方向/ ($^{\circ}$)
1号	4.8	235	4.9	233	0.2	16
2号	4.5	252	4.6	254	-0.1	122
3号	7.0	334	7.4	342	-0.7	229
4号	7.1	325	7.3	324	-0.1	102
5号	6.5	257	6.1	258	-0.3	228
6号	6.5	238	6.5	238	0	112
7号	12.7	243	12.3	243	-0.2	241
8号	9.9	249	9.8	245	-0.2	204

表3 各测站潮周期悬沙输移通量分解 $\text{g}/(\text{m} \cdot \text{s})$

测站	方向	T_1	T_2	T_1+T_2	$T_3+T_4+T_5$	T_6+T_7	净输沙
1号	主流向	16.7	0.3	17.0	-5.8	-0.3	10.9
	横 向	33.9	-1.4	32.4	1.7	-1.4	32.7
2号	主流向	18.4	-0.8	17.6	-5.3	-1.4	10.9
	横 向	17.0	0.1	17.1	1.1	0.8	18.9
3号	主流向	32.2	-8.1	24.1	-22.5	0.4	2.0
	横 向	47.6	1.6	49.2	4.4	0.2	53.8
4号	主流向	42.6	-1.3	41.3	2.8	-0.2	43.9
	横 向	-1.0	-1.1	-2.0	0.2	0	-1.9
5号	主流向	79.0	4.0	83.0	-10.6	1.5	74.0
	横 向	9.7	3.1	12.8	0.3	2.8	16.0
6号	主流向	61.2	-0.4	60.8	8.1	-0.5	68.5
	横 向	0.2	0.5	0.7	0.4	1.0	2.1
7号	主流向	165.2	6.1	171.3	2.4	0.4	174.1
	横 向	34.1	1.8	35.9	-7.1	1.3	30.1
8号	主流向	114.8	1.3	116.1	-2.6	-1.9	111.5
	横 向	16.4	1.8	18.2	-4.7	3.7	17.1

表4 各测站潮周期悬沙输移大小及方向

测站	T_1+T_2		$T_3+T_4+T_5$		T_6+T_7		净输沙	
	大小/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	方向/ ($^{\circ}$)	大小/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	方向/ ($^{\circ}$)	大小/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	方向/ ($^{\circ}$)	大小/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	方向/ ($^{\circ}$)
1号	36.6	235	6.1	133	1.4	38	34.5	225
2号	24.5	254	5.4	129	1.6	146	21.8	238
3号	54.8	333	22.9	228	0.4	5	53.9	309
4号	41.4	324	2.8	317	0.2	128	44.0	323
5号	84.1	256	10.6	87	3.2	204	75.7	253
6号	60.9	238	8.2	236	1.2	123	68.5	237
7号	175.0	245	7.5	328	1.3	183	176.6	247
8号	117.5	249	5.4	17	4.1	140	112.8	249

测站处,由于其位于潮汐通道处,水深相对较大,因3号测站受地形束窄作用,流速很快,所以导致悬沙输移略有增大。博贺湾外海域5~8号测站的泥沙净输移方向与涨潮主流向一致,泥沙从湾外沿涨潮主流方向通过大、小放鸡岛与莲头岭之间的潮汐通道输移到湾内,一部分沿西北向输移到博贺港西南侧的博贺滩淤积下来,产生新的沙嘴,使得外渚湖口门宽度不断减小;另一部分沿西偏南方向输出博贺湾海域。湾内近岸海域1号和2号测站的净输沙方向均为西南向,受水东港附近径流下泄的影响,使得这两点处的输沙方向与涨潮主流向有一定的偏差。

湾顶处3号测站的主流向上的输沙量很小,而横向输沙较大,产生这种现象的原因有:在3号测站附近,潮汐通道发生了向北方向的偏转,加上上游下泄径流的顶托作用使泥沙偏向海岸的方向输移。各站净输沙方向与拉格朗日余流方向基本一致,总体呈现沿涨潮方向输沙的趋势。

3.1 平流输沙

平流输沙实际为综合考虑欧拉余流和斯托克斯余流输沙作用后的结果,其方向由拉格朗日余流控制,大小由潮平均水深、余流值和垂向潮平均含沙量共同决定。由表4可知,1号、2号和3号测站所在的博贺湾内近岸海域平流输沙方向与涨潮主流向有一定偏差,其余湾外各站输沙方向与涨潮主流向一致。5~8号测站所在湾外海域由于水深较大,平流输沙量要明显大于湾内各站平流输沙量。在主流向及横向上,各测站平流输沙量均接近于悬沙净输沙量;净输沙方向与拉格朗日余流方向基本一致,可见悬沙净输移由平流输沙项主导。 T_1 的方向与欧拉余流的方向一致,表3中所有在主流向上的 T_1 项均为正值,说明各点都是涨潮流占优,这与涨潮历时普遍长于落潮历时和涨潮流速大于落潮流速的潮汐特性相吻合。 T_2 输沙值很小,比 T_1 项小了1个数量级,方向与斯托克斯余流方向一致,但无明显规律。湾顶处3号测站的 T_2 项比其余测站的 T_2 输沙值大了将近1个数量级,是因为3号测站处受地形的束窄作用,水位变化量与水流变化量的相关性较强。

3.2 潮泵输沙

潮泵效应输沙是由于底部泥沙与水体之间相互交换以及滞后效应,导致悬沙浓度在涨落潮时期内不对称,同时在涨落潮流速和历时不对称的作用下,潮周期内涨落潮泥沙输移不能相互抵消,从而产生泥沙的净输移。各测站的潮泵效应输沙作用不强,相比平流输沙量小了一个数量级。以湾内的1号、2号、3号测站为例,通过分析含沙量与底层流速的关系来解释潮泵输沙机理,图2给出了含沙量与流速的过程线(流速正值表示涨潮,负值表示落潮)。位于水东港外航道的1号测站受径流影响,落潮时含沙量明显要高于涨潮时期,含沙量与流速之间存在1h的相位差。1号测站所在位置涨落潮流速很小,在涨急流后1h,含沙量基本处于最低点,说明在现有流速情况下很难将泥沙起动,涨潮水体含沙量主要为水体背景含沙量,而落潮时含沙量较大主要是因为水东港附近径流下泄携带了大量的泥沙。2号测站距岸线稍远,涨潮历时大于落潮历时,仍受径流影响,导致落潮含沙量明显大于涨潮含沙量。博贺湾顶的3号测站由于涨落潮的流速均很大,含

沙量维持在一个很高的水平,约 80 g/m^3 ,但落潮时期含沙量略大于涨潮时期。这是由于湾顶处的 3 号测站受地形束窄的影响,涨潮流速很大,有利于底部较多的泥沙悬浮进入水体,泥沙被带入外泻湖后,随着流速的减小,逐渐沉积下来,落潮时束水归槽,流速很快,且距径流海口较近,落潮历时大于涨潮历时,泥沙有较长时间发生再悬浮,并携带麻港河等多条小河汇入的高浓度泥沙,落潮水体含沙量要大于涨潮时期含沙量。综上所述,潮泵输沙主要由涨落潮时期含沙量的不对称及涨落潮流速和历时的不对称引起。

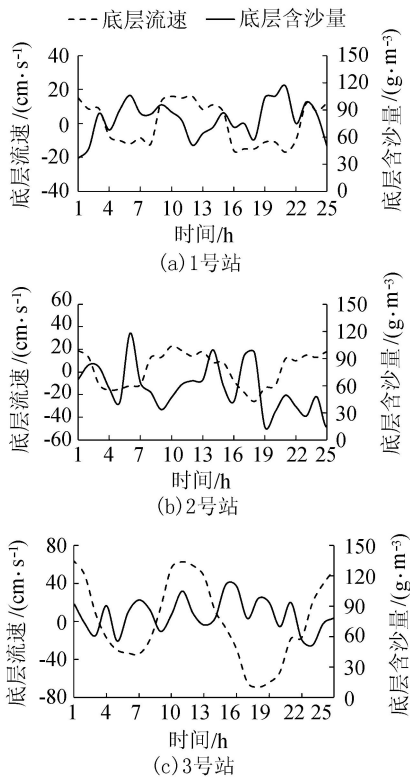


图2 含沙量与流速过程线

3.3 垂向净环流输沙

垂向净环流输沙是由拉格朗日余流和悬浮浓度在垂向上的不均匀分布引起的,由 T_6 、 T_7 组成。由表 4 可知垂向净环流输沙量很小,与平流输沙和潮泵效应输沙相比要小 1~2 个数量级。图 3 给出了沿涨落潮主流向的各余流垂向结构(图中纵坐标采用相对水深,0 表示水表层,1 表示水底层,横坐标表示余流大小,正值表示涨潮方向)。各垂线上欧拉余流从表层至底层方向一致,均沿涨潮方向,说明各站沿垂向都是涨潮流占优势,各测站表层欧拉余流均大于底层欧拉余流,但相差都不大,所以没有出现明显的垂向欧拉余环流。各测站的垂向各层斯托克斯余流值接近于零,对拉格朗日余流的垂向结构几乎没有影响,也就是说拉格朗日的余流和欧拉余流的垂向结构基本一致。

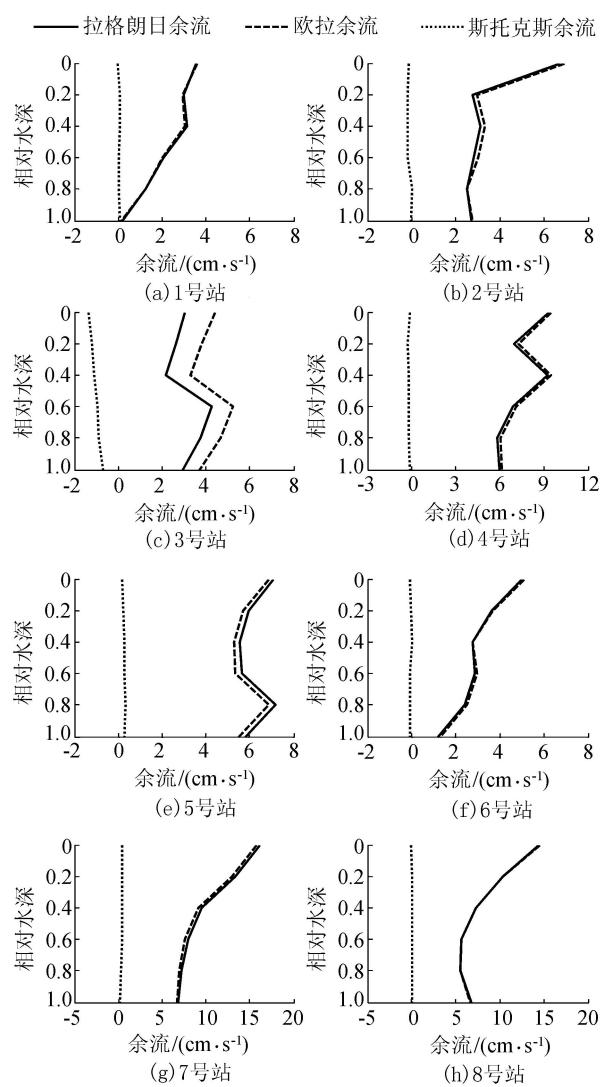


图3 各测站垂向余流结构

垂向含沙量的分布不均也是影响垂向净环流输沙的重要因素。表 5 给出了各层潮周期含沙量均值。表中底层与表层的差值介于 $-3\sim 9\text{ g/m}^3$ 之间,比值介于 $0.97\sim 1.13$ 之间,表层和底层含沙量相差很小,主要是因为大潮期间水动力强,垂向掺混作用剧烈,各层泥沙之间交换频繁,所以泥沙在垂向分布较均匀。各站拉格朗日余流和含沙量没有出现明显的垂向不均匀分布,导致各测站的垂向净环流输沙很小。

表5 垂向各层含沙量均值

测站	含沙量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)					
	表层	0.2H	0.4H	0.6H	0.8H	底层
1号	75	64	75	68	72	79
2号	58	53	61	63	54	58
3号	79	83	76	77	85	82
4号	67	70	64	65	67	68
5号	84	75	77	81	75	81
6号	65	70	70	73	63	63
7号	85	82	85	83	80	88
8号	71	82	88	77	81	80

4 结 论

- a. 博贺湾拉格朗日余流基本沿涨潮方向, 离岸越远, 余流值越大, 其中欧拉余流占主导, 斯托克斯余流很小。
- b. 各悬沙输移项中, 平流输沙项占主导作用, 净输沙方向和拉格朗日余流方向一致, 其中欧拉余流输沙作用明显, 而斯托克斯余流输沙作用非常小。
- c. 潮泵效应输沙作用不强, 比平流输沙项小了 1 个数量级。涨落潮潮流和含沙量的不对称性是产生潮泵输沙的主要因素。
- d. 垂向净环流的输沙贡献非常小, 该输沙项主要与拉格朗日余环流和含沙量的垂向分布结构有关。

参考文献:

[1] 李国胜, 王海龙. 黄河入海泥沙悬移输送机制的控制试验[J]. 地理研究, 2009, 28(3): 571-582. (LI Guosheng, WANG Hailong. Controlling experiments for dynamic mechanisms of suspended transport of SPM introduced from the Yellow River to the Bohai Sea[J]. Geographical Research, 2009, 28(3): 571-582. (in Chinese))

[2] DAVIES A M, XING J, HUTHNANCE J M, et al. Models of near-bed dynamics and sediment movement at the Iberian margin[J]. Progress in Oceanography, 2002, 52(2): 373-397.

[3] 王义刚, 孙继斌, 黄惠明, 等. 西沙门悬沙输移机制分析和讨论[J]. 水道港口, 2014, 35(6): 595-601. (WANG Yigang, SUN Jibin, HUANG Huiming, et al. Mechanism of suspended sediment transport in Xishamen[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2014, 35(6): 595-601. (in Chinese))

[4] 吴德安, 张忍顺, 严以新, 等. 辐射沙洲东大港潮流水道悬沙输移机制分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(2): 216-222. (WU Dean, ZHANG Renshun, YAN Yixin, et al. Mechanism of suspended sediment transport in Dongdagang tidal channel of radial sand ridges[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(2): 216-222. (in Chinese))

[5] BOWDEN K F. The mixing processes in a tidal estuary[J]. Air and Water Pollution, 1963, 7: 343-356.

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

[7] FISCHER H B. Mixing and dispersion in estuaries[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1976, 8(1): 107-133.

[8] 陈子燊. 珠江伶仃河口湾及邻近内陆架的纵向环流与物质输运分析[J]. 热带海洋, 1993, 12(4): 47-54. (CHEN Zishen. Analysis on longitudinal net circulations and material fluxes in Lingding Estuary, Pearl River and adjacent shelf waters[J]. Tropic Oceanology, 1993, 12(4): 47-54. (in Chinese))

[9] 任杰, 周作付, 林卫强. 伶仃洋低频水流与水沙纵向输

运[J]. 海洋通报, 2001, 20(1): 8-14. (REN Jie, ZHOU Zuofu, LIN Weiqiang. Low passed current and suspended fluxes in the Lingding Estuary[J]. Marine Science Bulletin, 2001, 20(1): 8-14. (in Chinese))

[10] TALKE S A, STACEY M T. Suspended sediment fluxes at an intertidal flat: the shifting influence of wave, wind, tidal, and freshwater forcing[J]. Continental Shelf Research, 2008, 28(6): 710-725.

[11] 杨晓东, 姚炎明, 蒋国俊, 等. 乐清湾悬沙输移机制分析[J]. 海洋通报, 2011, 30(1): 53-59. (YANG Xiaodong, YAO Yanming, JIANG Guojun, et al. Study on the transport mechanism of suspended sediment in Yueqing Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(1): 53-59. (in Chinese))

[12] 刘运令, 汪亚平, 吴祥柏, 等. 南黄海苏北近岸西洋水道水沙输运机制分析[J]. 海洋科学, 2011, 35(11): 120-127. (LIU Yaling, WANG Yaping, WU Xiangbai, et al. Mechanism of water and suspended sediment transport in the Xiyang Channel along the southwestern Yellow Sea coast[J]. Marine Sciences, 2011, 35(11): 120-127. (in Chinese))

[13] 吴海军, 王静, 付方, 等. 茂名港附近区域潮流特征分析[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(6): 40-43. (WU Haijun, WANG Jing, FU Fang, et al. Analyses on characteristics of currents around Maoming Harbor[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2008, 27(6): 40-43. (in Chinese))

[14] 戴志军, 韩震, 恽才兴, 等. 茂名海域水体表层悬浮泥沙浓度时空分布特征的遥感分析[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4): 455-462. (DAI Zhijun, HAN Zhen, YUN Caixing, et al. Remote Sensing analysis of special and temporal distribution characteristics of surface suspended sediment concentration in the Maoming sea area[J]. Advances in Marine Science, 2006, 24(4): 455-462. (in Chinese))

[15] 张有钦. 茂名港沙坝泻湖海岸泥沙运动特征分析[J]. 水运工程, 2004(11): 39-42. (ZHANG Youqin. Characteristics of sediment movement on the coast of sandbank and lagoon of Maoming port[J]. Port & Waterway Engineering, 2004(11): 39-42. (in Chinese))

[16] 孙伟富. 我国海岸潟湖遥感监测与典型潟湖分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.

[17] 张文静, 朱首贤, 沙文钰. 二维悬沙长期输运速度的定义和机理分析[J]. 海洋工程, 2003, 21(3): 56-61. (ZHANG Wenjing, ZHU Shouxian, SHA Wenyu. Definition and mechanism analysis of two-dimensional long-period transport velocity of suspended sediment[J]. The Ocean Engineering, 2003, 21(3): 56-61. (in Chinese))

[18] 赵方方, 李占海, 李九发, 等. 长江口北支小潮至大潮水沙输运机制研究[J]. 泥沙研究, 2013(4): 55-62. (ZHAO Fangfang, LI Zhanhai, LI Jiufa, et al. Mechanism of water and suspended sediment transport from neap tide to spring tide in North Branch of Changjiang Estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2013(4): 55-62. (in Chinese))

(收稿日期: 2015 - 11 - 10 编辑: 熊水斌)