

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2008.06.024

伶仃洋西槽洪季水沙纵向输移机制研究

冯向波, 张蔚

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:根据2003年实测数据,运用物质纵向输移模式计算了丰水大潮期伶仃洋西槽的水量和泥沙纵向输移量,研究了伶仃洋西槽洪季水沙纵向输移机制及水量输移特征,并针对泥沙输移特征,用底层流速和含沙量的相位变化以及表底层盐度的变化对悬沙输移机制进行了分析.结果表明,伶仃洋西槽垂向环流发育,泥沙输移特征明显.径流、潮流变形以及盐淡水异重流是形成西槽水量输移的主要原因.潮流不对称性和底层泥沙再悬浮对潮汐捕集输沙的贡献明显,盐淡水混合和纵向水体梯度对垂向净环流输沙的贡献明显.

关键词:伶仃洋 纵向输移 潮汐捕集 垂向环流

中图分类号:TV142

文献标识码:A

文章编号:1000-1980(2008)06-0838-04

珠江口伶仃洋是一个多口门汇入的喇叭状河口湾,属弱潮河口,潮型为不规则半日混合潮.该河口为部分混合河口,环流发育^[1-2],同时潮流在河口湾内发生变形.伶仃洋水沙输移复杂^[3],既有随径流输入的陆域来沙,也有随潮流输入的海域来沙.口湾内的悬沙在水流作用下产生纵向输移,径流输沙、Stokes 余流漂移效应、潮汐捕集作用和盐淡水混合作用是产生泥沙纵向输移的主要原因.

珠江在洪季的径流量和输沙量十分显著,所以研究洪季水沙输移机制对河口地貌和航道维护至关重要.物质纵向输移模式^[4-6]是目前研究水沙输移机制较为成熟和可靠的方法^[7],本文运用该方法重点研究伶仃洋西槽2003年洪季大潮期的水量纵向输移、潮汐捕集输沙和垂向净环流输沙的机制.

1 研究区域和研究资料

伶仃洋河口湾有珠江口东四口门汇入,各个口门的山潮比和承泄的悬沙量差别较大^[8].虎门多年平均的山潮比为0.26,径流弱潮流强,属于潮流型口门.蕉门、洪奇门和横门的山潮比分别为1.74、2.15和2.74,潮流弱径流强,均属于径流型口门.蕉门的入海悬沙量最大,占4个口门总输沙量的38%,其他3个口门的输沙量分别为:虎门占20%,洪奇门占15%,横门占27%.本文研究区域为伶仃洋西槽,测点(V1, V3, V5, V6)分布见图1.

伶仃洋西槽潮差从口外向口内递增,落潮历时大于涨潮流历时.潮流基本上为往复流,落潮流明显强于涨潮流.本文利用2003年在伶仃洋调查中取得的测站流速、流向、盐度、水深、悬沙含量等实测资料,取7月29~30日25h的大潮同步连续观测资料进行分析.该时段内,测点V6潮差2.4m,其余测点潮差2.8m左右.测点V3落潮流速最大,为1.34m/s,测点V1涨潮流速最大,为1.2m/s.

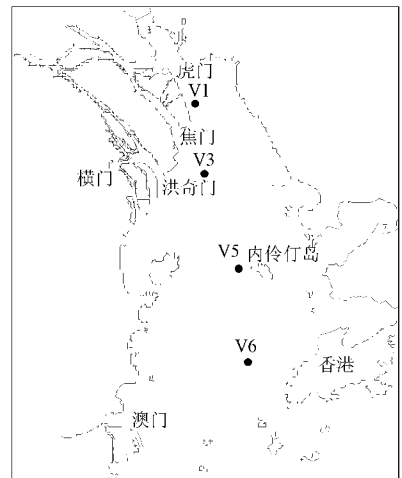


图1 伶仃洋及测点布置

Fig.1 Lingdingyang Bay and layout of measuring points

2 西槽水量纵向输移机制研究

物质纵向输移模式^[4-6]中引入了 Euler 余流、Stokes 余流和 Lagrange 余流的概念. Euler 余流表示测点流速

收稿日期:2007-11-06

基金项目:河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金(2007491111) 中国博士后科学基金(20070420965)

作者简介:冯向波(1982—),男,山东东营人,博士研究生,主要从事河口海岸水动力学研究.

的周期平均值,Stokes 余流表示潮汐与潮流的相关项,二者之和为 Lagrange 余流,即物质输移速度.取观测资料,按水量纵向输移模式计算,视西槽主槽方向为纵向,结果见表 1 和图 2(图表中正号表示向海,负号表示向陆).为了分析水流特征,本文还计算了各个测点的优势流.所谓优势流,就是落潮流速过程线与横坐标所包的面积除以涨落潮流速过程线与横坐标所包面积之和^[9],为无因次值.

图 2 和表 1 表明了周期内西槽的垂向 Euler 余流分布,上层为下泄流,下层为上溯流,测点处的流速垂向差别最大可达 30 cm/s.河口环流发育明显,其中测点 V3 最为显著,流速分层最为明显.各测点垂向平均 Euler 余流最大差别为 18 cm/s.除测点 V1 为向陆余流外,其余各测点均为下泄 Euler 余流,强度从口外向口内递减.虎门为潮汐通道,测点 V1 受潮流影响显著,环流发育不明显.蕉门、洪奇门和横门承泄西北江径流量大,所以沿口内向口外方向,测点的 Euler 余流输水量向海增加.潮流向口内推进过程中发生变形,测点流速显示:沿口外向口内方向,涨潮流速逐渐增大,落潮流速逐渐减小,受潮流变形的影响逐渐增大.潮流变形可以通过优势流体现(表 1),测点 V1 为上溯优势流,测点 V3~V6 为下泄优势流,下泄强度增强.盐淡水异重流使得下层水体在密度梯度的作用下上溯,异重流也是形成河口环流的重要原因. Euler 余流输水量的走势与 Euler 余流相对应.

垂向平均 Stokes 余流一致流向口内.余流流速在纵向和垂向的变化不大,在 1~4 cm/s 之间.垂向分布的 Stokes 余流流速值较小,方向为顺着潮波的传播方向.测点的数据表明,潮汐和潮流的相位存在相关性,Stokes 余流体现了该相关性. Stokes 余流漂移效应在伶仃洋西槽纵向水量的输移过程中占有重要地位,从净输水量来看,测点 V1,V3 和 V5 的 Stokes 余流输水量和 Euler 余流输水量相近. Stokes 余流具有加强上溯流和削减下泄流的作用,加强了水量的向陆输移.

Euler 余流比 Stokes 余流大得多,所以 Lagrange 余流与 Euler 余流的走势一致. Lagrange 余流净输水量的特征类似于 Euler 余流输水量,除测点 V1 外,其余测点的 Lagrange 余流净输水量均向海.

3 西槽悬沙纵向净输移机制

取实测数据,按悬沙纵向输移模式^[4-6]计算,结果见表 2(表中正号表示向海,负号表示向陆).其中悬沙纵向净输移中各项的含义^[9]如下: T_1 为平均流引起的悬沙输移; T_2 为潮汐与潮流相关项,即 Stokes 余流漂移量; T_1+T_2 为平流输移,即 Lagrange 余流输移量; T_3 与潮汐和悬沙含量的潮变化相关; T_4 与潮流场和悬沙含量的潮变化相关,即通常所说的潮汐捕集作用; T_5 与垂向流速和含沙量变化相关,部分混合河口一般存在垂向环流^[10],底层含沙量高于表层即可产生净向陆的泥沙输移,故 T_5 为垂向净环流的贡献; T_6 和 T_7 与时均量和潮振动切变引起的剪切扩散相关; T_8 与垂向潮振荡切变作用相关.

表 2 各输沙项所占百分比及净输移量

测点	各输沙项所占的百分比/%								净输移总和/ ($\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$)
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	
V1	-42.37	-31.29	-2.06	-38.63	-7.93	5.46	-0.91	17.73	-0.034
V3	102.92	-44.45	-4.20	-60.25	-106.96	5.88	3.72	3.33	-0.100
V5	439.98	-162.50	-5.69	-24.60	-205.49	42.45	5.04	10.81	0.010
V6	376.11	-63.08	-5.95	-35.43	-202.19	16.41	3.11	11.02	0.018

表 1 西槽纵向余流流速、单宽净输水量及优势流
Table 1 Residual flows, net water discharge per unit width and predominant flows

测点	余流/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)			平均净输水量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)			优势流 (落潮)
	Euler	Stokes	Lagrange	Euler	Stokes	Lagrange	
V1	-6.940	-2.404	-9.344	-0.657	-0.227	-0.884	0.49
V3	3.400	-3.230	0.170	0.360	-0.342	0.018	0.58
V5	6.060	-3.737	2.323	0.598	-0.369	0.229	0.60
V6	11.740	-2.652	9.088	1.166	-0.263	0.902	0.67

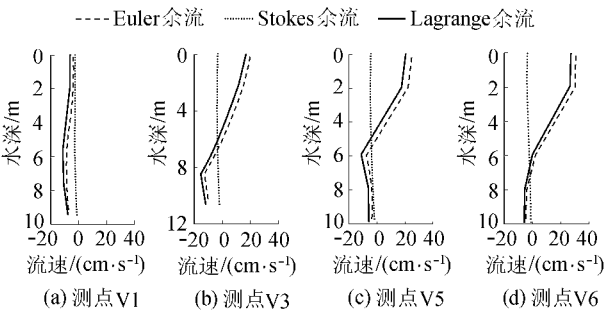


图 2 西槽 Euler,Stokes 和 Lagrange 余流的垂向结构
Fig.2 Vertical distribution of the Euler, Stokes and Lagrange residual flows

由计算结果知,西槽悬沙输移方向在内伶仃岛附近发生转变,伶仃岛以内为向陆输移,以外为向海输移。 T_1, T_2 项与 Euler 余流输水、Stokes 余流输水相对应, T_3, T_6, T_7 和 T_8 项所占的百分比很小,本文不再对其机制进行探讨. 以下对输移机制复杂的 T_4, T_5 项进行重点分析.

3.1 潮汐捕集输沙机制

T_4 是潮流场和悬沙含量的潮变动相关项,受到潮汐和潮流的周期性影响,主要发生在悬沙含量高和受潮流影响显著的底层. T_4 在悬沙输移中占有重要的地位,除测点 V5 外, T_4 所占比例接近 T_2 .

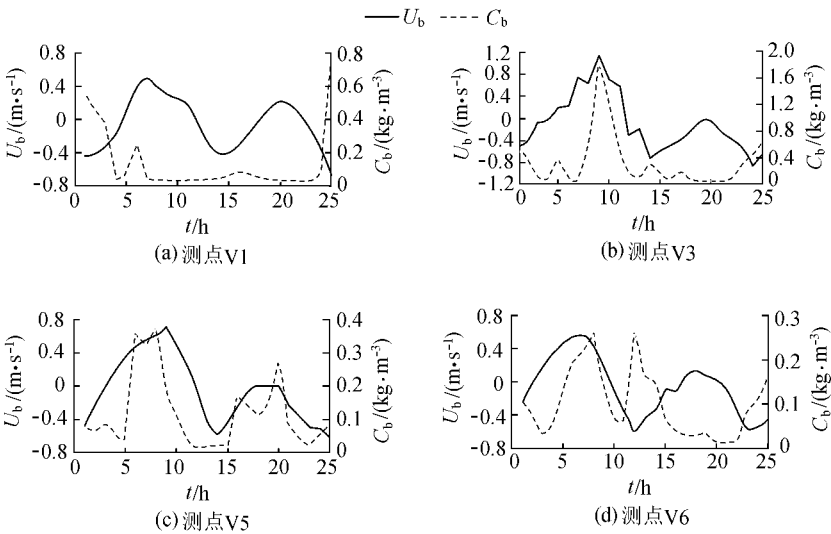


图3 测点底层流速(U_b)和底层悬沙含量(C_b)相位分布

Fig.3 Phase distribution of bottom velocity and bottom suspended sediment concentration

含沙量有所增加. 整个涨潮阶段保持相对较高的含沙量. 测点 V1 含沙量的这些特征与该点处的来水来沙情况相关,虎门承泄的径流量和泥沙量比较小. 测点 V1 在涨急时刻的含沙量达到最大,说明涨急流速致使河床泥沙再悬浮,同时涨潮流携带了较多泥沙,表明海相含沙量较高. 测点 V3 相位图表明在落急时刻附近含沙量达到最大值,并且该点底层涨落潮不对称性最强. 涨落潮历时的不对称性在一定程度上抑制了泥沙向海输移. 焦门入海径流的含沙量比较高,随径流下泄的泥沙滞留在此处,由潮流从口外携带的部分泥沙受到径流的作用也滞留在此处,泥沙含量达到最大值,泥沙净输移量也达最大值. 测点 V5 处下泄水流对含沙量的影响占主导地位. 自测点 V3 下泄的水流携带较多泥沙,使得测点 V5 的含沙量在落潮时保持较高值,与测点 V1 的含沙量特征相对应. 测点 V6 的含沙量在高高潮的落急和涨急时刻均达到最大值. 可见,悬沙含量与流速的大小和相位是存在相关性的.

3.2 垂向净环流输沙机制

垂向净环流输沙项 T_5 主要由盐淡水混合和纵向水体梯度造成,输移方向向陆,在悬沙输移中的贡献相当显著,超过了 Stokes 余流漂移效应引起的输沙.

在盐淡水交汇地带,由于盐度和悬沙垂向分布的不均匀性,垂向梯度增大,异重流发育^[12]. 珠江径流含沙量相对较低,随表层水流下泄入海,底层含沙量较高,在潮流和异重流作用下输移向陆,垂向环流输沙总量向陆输移. 盐淡水的混合程度 T_5 有重要贡献. 表底层盐度值分布(图4)印证了上述观点的正确性. 测点 V1 受

潮流的不对称性和底层泥沙再悬浮是导致产生 T_4 的主要原因^[11]. 潮流不对称性使由潮流从口外带来的部分泥沙和由径流从上游带来的部分泥沙被截留下来,聚集在径流和潮流作用相当的动力平衡带内,形成最大浑浊带. 测点的数据表明,最大含沙量在测点 V3,该点径流和潮流作用相互平衡,净输水量最小(表1),印证了上述潮汐捕集输沙的机制. 为了进一步分析潮汐捕集输沙的机制,现仅对底层的流速和悬沙含量进行相位分析,见图3.

测点 V1 相位图显示:该点最大含沙量出现在高高潮的涨急时刻;整个落潮阶段保持较低含沙量,在落急时刻有一部分泥沙发生悬浮,

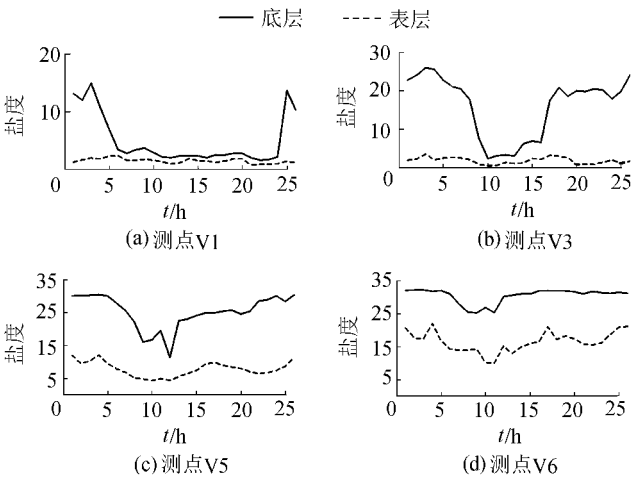


图4 测点表底层盐度随时间的变化

Fig.4 Change of surface and bottom salinities with time

盐水异重流影响的时间较短,所以垂向环流作用不明显, T_5 贡献不大.测点 V3 底层的盐度峰值明显增大,底层潮流具有较高盐度和较高含沙量,受外海高盐度潮水的影响时间也增加,异重流的作用明显,所以 T_5 的贡献增大.随着外海盐水影响时间和强度的增加,盐淡水混合程度增加,测点 V5 和 V6 的表底层盐度值增大, T_5 的贡献增大.

4 结 论

- a. 除测点 V1 外,西槽的河口环流发育,Euler 余流为下泄余流,强度从口内向口外递增;垂向平均的 Stokes 余流一致流向口内;Lagrange 余流与 Euler 余流的走势一致.
- b. 西槽的潮汐捕集输沙均为向陆输移,测点 V3 处最大.潮流的不对称性和底层泥沙再悬浮是导致产生潮汐捕集输沙的主要原因,底层流速和含沙量的相位相关分析较好地解释了该机制.
- c. 西槽的垂向净环流输沙也均为向陆输移,贡献沿口内向口外增加.盐淡水混合程度和纵向水体密度对垂向净环流输沙影响显著.

参考文献:

[1] GARVINE R W.Observations of the motion field of the Connecticut River plume[J].J Geophys Res,1977,82:441-454.
[2] INGRAM R G.Characteristics of the Great Whale River plume[J].J Geophy Res,1981,86:2017-2033.
[3] 严以新,高进,郑金海,等.长江口南港泥沙运动的水动力条件[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(5):1-6.
[4] UNCLES R J,EEEEIORTT R C A,WESTON S A.Observed fluxes of water,salt and suspended sediment in a partly mixed estuary[J].Estuarine,Coastal and Shelf Science,1985,20:147-167.
[5] DYER K R.Estuaries:a physical introduction[M].London:John Wiley & Sons Inc.,1973:140.
[6] SU Ji-lan,WANG Kang-shan.The suspended sediment balance in Changjiang Estuary Estuarine[J].Coastal and Shelf Science,1986,23:81-98.
[7] 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.
[8] 严恺.海岸工程[M].北京:海洋出版社,2002:480-481.
[9] 沈焕庭,潘定安.长江河口最大浑浊带[M].北京:海洋出版社,2001:93.
[10] 赵今声,赵子丹,秦崇仁,等.海岸河口动力学[M].北京:海洋出版社,1993:441.
[11] 沈健,沈焕庭,潘定安,等.长江口最大浑浊带水沙输移机制分析[J].地理学报,1995(5):411-419.
[12] 应秩甫,陈世光.珠江口伶仃洋咸淡水混合特征[J].海洋学报,1983(1):1-10.

Longitudinal transport mechanism of water and sediment in west channel of Lingdingyang Bay during flood season

FENG Xiang-bo, ZHANG Wei

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resource and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the measured data in 2003, the longitudinal material transport model was employed to calculate the longitudinal transport of water and sediment in the west channel of Lingdingyang Bay during ghe flood season with spring tides. With regard to the characteristics of sediment transport, the transport mechanism of suspended sediment was analyzed by use of the phase distribution of bottom velocity and sediment concentration and change of surface and bottom salinities. The results show that the vertical circulation of the west channel of Lingdingyang Bay is well developed and the suspended sediment transport is obvious. The deformation of runoffs and tidal currents as well as the density flows of saline and fresh water is the main cause for the transport of water in the west channel. The tidal asymmetry and re-suspended of bottom sediment are contributive to the tidal catching, and the mixture of saline and fresh water and the longitudinal gradient of water is contributive to the vertical circulation of net sediment transport.

Key words: Lingdingyang Bay; longitudinal transport; tidal catching; vertical circulation