

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.02.001

童朝锋, 郑联泉, 孟艳秋, 等. 兴化湾悬沙输移机理分析[J]. 水利水运工程学报, 2016(2): 1-10. (TONG Chao-feng, ZHENG Lian-xiao, MENG Yan-qiu, et al. Mechanism of suspended sediment transport in Xinghua bay[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(2): 1-10.)

兴化湾悬沙输移机理分析

童朝锋, 郑联泉, 孟艳秋, 时 健

(河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 运用通量机制分解法处理兴化湾各测站的水沙实测资料,通过探讨平流输沙、潮泵效应输沙、垂向净环流输沙机理,分析研究了兴化湾海域悬沙输移特征,进而讨论了净输沙对研究区域地形变化的影响。结果表明:在潮汐作用下,外海泥沙沿兴化水道与南日水道向湾内输移,但对湾内淤积产生的影响较小;平流输沙和垂向净环流输沙对悬沙的净输移起主要作用,水深相对较大的区域主要受平流输沙的控制,而浅水区垂向净环流输沙影响更强;潮泵输沙以悬沙与潮流变化相关项为主,输沙量小于平流输沙和垂向净环流输沙的输沙量;浅水区垂向各层余流方向不一致,悬沙各层混合均匀,深水区表底层的余流方向基本一致,含沙量垂向变化明显;输沙造成湾顶淤积,造成海湾地形变化的主要原因是陆源泥沙。

关 键 词: 通量机制分解法; 悬沙输移; 平流输沙; 潮泵效应; 垂向环流

中图分类号: TV148 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2016)02-0001-10

兴化湾是福建省潮汐动力较强海湾^[1],多年平均潮差达到 5.22 m。湾内泥沙来源包括注入湾内的河流来沙、岸滩侵蚀入海以及湾外在潮汐作用下通过水道进入湾内的泥沙。在潮汐、波浪动力作用下,湾内不同部位以及湾内外泥沙不断发生输移交换。同时兴化湾围垦工程、港口工程的建设,一定程度上改变了兴化湾地貌格局,可能会影响湾内原始动力环境和泥沙输运规律。为此,分析兴化湾悬沙输移机理,可为湾内泥沙输运、地形和港口航道演变研究提供科学依据。通量机制分解法是目前通量机制研究中较为可靠的方法^[2],并在河口海岸水沙输运研究中不断得到应用发展^[3-7]。

本文采用通量机制分解法,对兴化湾水沙实测资料进行处理,通过探讨平流输沙、潮泵效应输沙、垂向净环流输沙的机理,分析研究兴化湾海域悬沙输移特征。

1 研究区域概况

兴化湾位于福建省沿海中部,北与福州市相接,西和莆田市紧邻。湾周边由北部和东北部的龙高半岛、西部莆田平原和南部石城半岛所环抱,东南湾口有南日群岛掩护。湾口朝向东南,部分岸线由基岩海岸组成,局部为淤积质、砂质海岸。湾内水域宽阔,东西长达 50 km,南北宽约 21 km,面积约 1 000 km²。湾内主槽自福清市江阴半岛最南端的壁头至湾口,有南日岛北侧的兴化水道及南日岛西侧的南日水道,两条水道自然水深绝大部分都在-20 m 以上(图 1),水深条件良好。江阴半岛的西侧有水闸,湾周边有木兰溪和萩芦溪注入,均为小河流,根据 1959—1979 年两溪统计资料:多年平均流量分别为 49.5 和 30.6 m³/s;多年平均含沙量为 0.30 kg/m³,年均输沙量分别为 46.5 和 28.9 万 t。兴化湾海域潮汐为正规半日潮,最大潮差 7.51 m,最小潮差 2.95 m,平均潮差 5.22 m。兴化湾潮流为非正规半日浅海潮流,湾内涨落潮流由南日水道、兴化水

收稿日期: 2015-06-23

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51339005);国家自然科学基金青年基金资助项目(51409094)

作者简介: 童朝锋(1973—),男,浙江宁波人,副教授,主要从事河口海岸动力学研究。E-mail: chaofengtong@hhu.edu.cn

道二股水流所形成,流路稳定,呈往复流运动,南日岛外侧海区为逆时针旋转流。兴化湾的泥沙来源可分为注入湾内的河流来沙、岸滩侵蚀入海以及湾外在潮汐作用下通过水道进入湾内的泥沙,其中河流年平均入海沙量为 75.7 万 t,为湾内主要泥沙来源。河口位置、兴化湾内及外海区域的沉积物主要为黏土质粉砂和粉砂质黏土。而极粗砂等粒径较大的物质主要分布于水深较大或水动力较强的区域。兴化湾海区悬移质泥沙粒径较细,属黏土质粉砂。兴化湾属于低含沙海域,水体清澈,含沙量在平面上的分布呈现下列规律:外海小,由兴化水道和南日水道向兴化湾内逐渐增大,至江阴壁头附近达到最大;在垂线分布呈现表层低、底层高的特点^[8-9]。

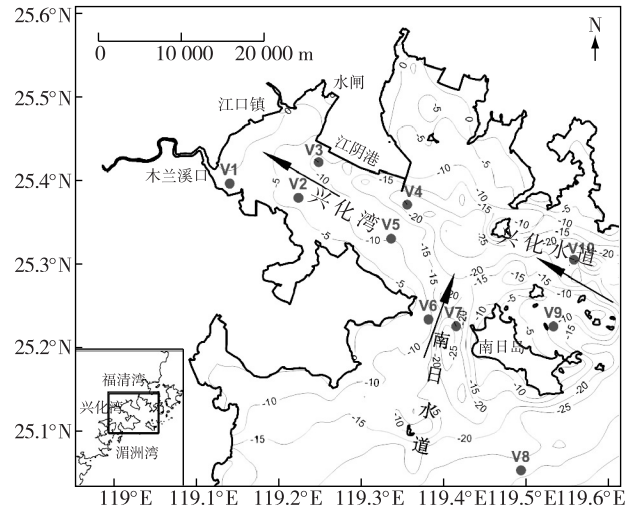


图 1 兴化湾地形与测站位置

Fig. 1 Topography of Xinghua bay and location of observation stations

2 研究方法

2.1 资料来源及测站分布

采用 2008 年 4 月 25—26 日大潮期间 V1~V10 的测站实测水文泥沙资料展开分析研究,测站分布见图 1。流速和流向测量采用 SLC9-2 型直读式海流计,各垂线流速、流向每整点测量一次,各垂线测点数根据实际水深情况采用分层法对表层,0.2H,0.4H,0.6H,0.8H 和底层施测。采用台式光电测沙仪测量含沙量,运用分层法在相同深度处与潮流同步施测。

2.2 数据分析方法

为研究水沙在兴化湾、南日水道和兴化水道的输运通量,以各测点 1 个潮周期内涨潮平均流向为纵向正向,以顺时针垂直于纵向的方向为横向正向,将实测资料分别向两个方向投影。

计算过程中,将瞬时流速 $U(z, t)$ 在纵(横)向上的投影值 $u(z, t)$ 分解为垂向平均值及其偏差项之和,即:

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

垂向平均值 $\bar{u}$ 和偏差项 u' 又可分解为潮平均量和潮变化项之和,即: $\bar{u} = \bar{u}_0 + \bar{u}_t$, $u' = u'_0 + u'_t$, 则 $u(z, t)$ 可以写成: $u(z, t) = \bar{u}_0 + \bar{u}_t + u'_0 + u'_t$ (2)

$$\text{瞬时悬沙含沙量可记为: } c(z, t) = \bar{c}_0 + \bar{c}_t + c'_0 + c'_t \quad (3)$$

考虑到潮振荡的影响,水深也随潮周期而发生较大变化,可将水深分解为潮平均量与潮变化项之和,即:

$$h = h_0 + h_t \quad (4)$$

$$\text{单宽输水量为: } \langle Q \rangle = \langle U_E + U_S \rangle h_0 (\langle \rangle \text{表示潮平均,下同}) \quad (5)$$

$$\text{取一阶近似,则: } U_L = U_E + U_S \quad (6)$$

式中: $U_E = \bar{u}_0$ 称为垂向平均欧拉余流,指由风海流、密度流、径流和潮汐余流等因素控制的水体净输移方向; $U_S = \langle h_t \bar{u}_t \rangle / h_0$ 为斯托克斯漂流,其直接体现水位变化量与水流变化量的相关性; U_L 称为拉格朗日余流,指的是 1 个或多个潮周期时段内对流体微团的水体速度的平均。

则悬沙潮周期 T_t 平均瞬时单宽悬沙输移通量 T 的计算式为

$$T = \frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} \int_0^1 h u c dz dt = h_0 \bar{u}_0 \bar{c}_0 + \langle h_t \bar{u}_t \rangle \bar{c}_0 + \langle h_t \bar{c}_t \rangle \bar{u}_0 + \langle h_t \bar{u}_t \bar{c}_t \rangle + h_0 \bar{u}_0' \bar{c}_0' + \langle h_t u_0' c_0' \rangle + \langle h_t u_t' c_0' \rangle + \langle h_t u_t' c_t' \rangle \quad (7)$$

式中:等式右侧各项依次记为 $T_1 \sim T_8$, T_1 表示平均流引起的悬沙输移; T_2 为斯托克斯漂移输移量; $T_1 + T_2$ 组成

平流输移项; T_3 表示潮汐与含沙量的潮变化相关项; T_4 表示悬沙与潮流场的变化相关项; T_3, T_4 共同组成“潮泵作用”输移项, 理论上, $\bar{u}_t, \bar{c}_t, h_t$ 各自潮周期平均值为零, 但三者的相关产生了泥沙净输移; T_5 表示垂向流速与含沙量变化的相关项, 为垂向径环流的贡献; T_6, T_7 表示时均量与潮汐振动切变引起的剪切扩散; T_8 表示垂向潮振荡切变作用^[10-12]。

3 悬沙输移计算结果

运用式(1)~(7)对潮周期平均单宽净输移量 T 及各输沙项进行了计算, 图 2 为各测点潮周期平均单宽悬沙输移净通量示意图, 表 1 为各动力项潮周期平均输沙量、对应角度与占总输沙量的比例, 其中总输沙量即潮周期平均单宽悬沙输移净通量, 是各输沙项输沙量的矢量之和, 而各输沙项占总输沙量之比是矢量模之比。表 2 为潮流、水深、余流、含沙量特征值。

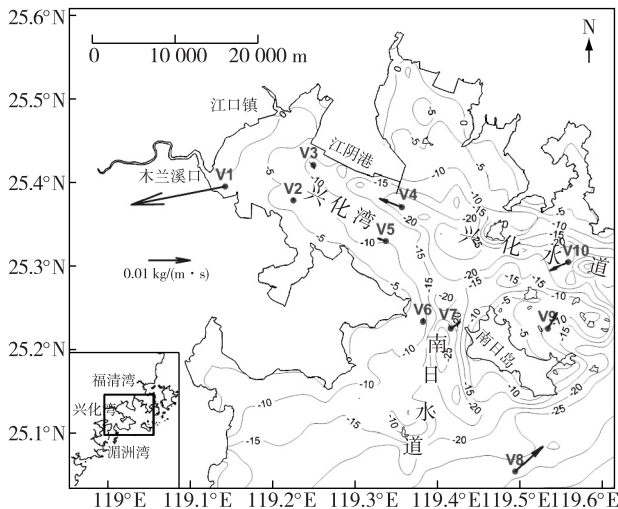


图 2 潮周期平均单宽悬沙输移净通量
Fig. 2 Tidal-averaged suspended sediment flux per unit width

表 1 各动力项潮周期角度、各平均输沙量及其占总输沙量之比

Tab. 1 Tidal-averaged suspended sediment flux, direction and proportion of each dynamic term												
测站	项目	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T	T_1+T_2	T_3+T_4
V_1	各输沙项输沙量(kg/(m·s))	0.004 2	0.013 8	0.001 5	0.005 6	0.012 7	0.001 2	0.000 8	0.000 7	0.023 2	0.010 0	0.006 8
	角度(°)	67	268	247	282	226	54	47	239	259	276	274
	各输沙项占总输沙量之比(%)	18	60	6	24	55	4	3	3		43	29
V_2	各输沙项输沙量(kg/(m·s))	0.000 5	0.000 6	0	0	0.000 6	0	0	0	0.000 8	0.000 5	0
	角度(°)	356	234	356	304	327	342	121	20	323	289	311
	各输沙项占总输沙量之比(%)	62	70	1	5	77	2	3	3		65	5
V_3	各输沙项输沙量(kg/(m·s))	0.000 9	0.000 1	0	0	0.000 7	0	0	0	0.000 8	0.000 9	0.000 1
	角度(°)	115	291	115	134	246	233	74	235	164	115	125
	各输沙项占总输沙量之比(%)	119	8	5	6	84	3	2	1		111	10
V_4	各输沙项输沙量(kg/(m·s))	0.003 5	0.000 2	0	0	0.002 5	0	0	0.000 1	0.005 8	0.003 7	0.000 1
	角度(°)	285	296	284	294	303	249	123	134	291	285	292
	各输沙项占总输沙量之比(%)	61	3	0	1	44	0	0	1		64	1
V_5	各输沙项输沙量(kg/(m·s))	0.004 0	0.001 1	0	0	0.006 3	0.000 1	0	0	0.002 0	0.004 9	0
	角度(°)	66	101	66	346	261	263	314	268	289	73	28
	各输沙项占总输沙量之比(%)	197	52	2	1	315	3	1	0		242	2
V_6	各输沙项输沙量(kg/(m·s))	0.000 9	0.000 4	0	0	0.000 1	0	0	0	0.000 6	0.000 5	0
	角度(°)	20	229	200	53	90	133	196	9	10	357	73
	各输沙项占总输沙量之比(%)	153	75	1	3	21	0	1	0		95	2
V_7	各输沙项输沙量(kg/(m·s))	0.001 4	0.000 3	0	0	0.001 5	0	0.000 1	0	0.002 7	0.001 4	0
	角度(°)	74	169	74	182	29	157	50	3	56	85	180
	各输沙项占总输沙量之比(%)	54	10	0	2	56	0	2	2		54	2
V_8	各输沙项输沙量(kg/(m·s))	0.008 2	0.000 2	0.000 1	0	0.005 3	0	0.000 2	0	0.008 9	0.008 1	0.000 1
	角度(°)	83	237	263	248	344	194	64	115	48	84	259
	各输沙项占总输沙量之比(%)	92	2	1	0	59	1	2	0		90	1
V_9	各输沙项输沙量(kg/(m·s))	0.001 3	0.000 1	0	0.000 1	0.003 1	0	0.000 1	0	0.004 4	0.001 2	0.000 1
	角度(°)	16	195	16	315	39	45	55	212	32	16	316
	各输沙项占总输沙量之比(%)	30	2	0	2	71	1	2	0		28	2

(续表)

测站	项目	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T	T_1+T_2	T_3+T_4
V_{10}	各输沙项输沙量($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)	0.003 7	0.000 4	0	0.000 1	0.004 1	0	0	0	0.004 8	0.004 1	0.000 1
	角度($^{\circ}$)	301	294	121	296	193	201	83	60	246	300	295
	各输沙项占总输沙量之比(%)	77	8	0	2	84	0	1	0		85	1

表 2 各测点潮流、水深、余流、含沙量特征值
Tab. 2 Characteristic values of tidal current, water depth, residual currents and sediment concentration

测站	潮流	平均 流向/ $(^{\circ})$	流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	历时/h	潮周期 平均水深/m	欧拉余流	斯托克斯漂流	拉格朗日余流	潮平均含沙量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
V_1	涨潮	228	0.50	10	4.52	0.011/67	0.036/268	0.026/276	0.085
	落潮	58	0.47	15					
V_2	涨潮	296	0.35	12	6.90	0.009/356	0.010/234	0.009/289	0.008
	落潮	114	0.34	12					
V_3	涨潮	286	0.25	12	8.54	0.065/115	0.004/291	0.060/115	0.002
	落潮	115	0.30	12					
V_4	涨潮	299	0.39	12	28.26	0.063/285	0.003/296	0.065/285	0.002
	落潮	126	0.26	13					
V_5	涨潮	298	0.34	12	20.36	0.061/66 流向	0.016/101 66	0.075/73 101	0.003 73
	落潮	103	0.36	13					
V_6	涨潮	27	0.24	14	10.56	0.040/20	0.020/229	0.025/357	0.002
	落潮	213	0.22	12					
V_7	涨潮	19	0.36	14	29.22	0.021/74	0.004/169	0.021/85	0.002
	落潮	189	0.30	12					
V_8	涨潮	53	0.24		29.01	0.287/83	0.006/237	0.282/84	0.001
	落潮	100	0.42						
V_9	涨潮	316	0.36	13	19.32	0.033/16	0.002/195	0.031/16	0.002
	落潮	121	0.35	11					
V_{10}	涨潮	298	0.39	13	36.04	0.061/301	0.006/294	0.068/300	0.002
	落潮	116	0.33	11					

注:“/”前数字表示流速,单位为 m/s ,”后数字表示流向,单位为 $^{\circ}$ 。

由表 1、表 2 和图 2 可知,处于木兰溪河口位置的 V_1 站含沙量明显高于其他测站,所以 V_1 站各输沙项均明显大于其他测站相对应的输沙项,并且 T 比其他测站大 2 个数量级以上,净输沙方向朝木兰溪上游;湾内靠湾顶位置的 V_2, V_3 站 T 最小, V_2 站向垂直于湾内水道的方向输移, V_3 站基本沿落潮方向向湾外输移;湾口深水位置的 V_4, V_5 站 T 比 V_2, V_3 站大 1 个数量级,净输沙方向均沿涨潮方向向湾内输运;南日水道 V_6, V_7 站 T 相对较小,净输沙方向接近于涨潮平均流向,向湾内偏兴化水道方向输移;外海的 V_8 站 T 仅次于 V_1 站,潮流流态为旋转流,净输沙方向为南日岛偏外海方向;处于兴化水道位置的 V_9, V_{10} 站 T 仅次于 V_1 和 V_8, V_9 的输移方向向北垂直于兴化水道, V_{10} 的输移方向靠近涨潮方向向湾内输移。

4 兴化湾悬沙输运机理分析

4.1 平流输沙

平流输沙综合考虑了欧拉余流与斯托克斯余流对悬沙输移的作用,由 T_1 和 T_2 项组成,方向与欧拉余流、斯托克斯余流输移方向一致,大小由潮平均含沙量、余流值和水深所决定。

T_1 的方向与欧拉余流方向一致,表征优势流对净输沙的贡献。由图3总体来看兴化湾左岸 T_1 向湾内输移而右岸输向湾外。 T_2 的方向由斯托克斯余流方向所决定,如图4, V_1 及兴化湾左岸的 V_3, V_4, V_{10} 站向湾内输移, V_5 站输向湾外,而 V_6, V_7, V_8, V_9 站 T_2 与 T_1 输移方向相反。

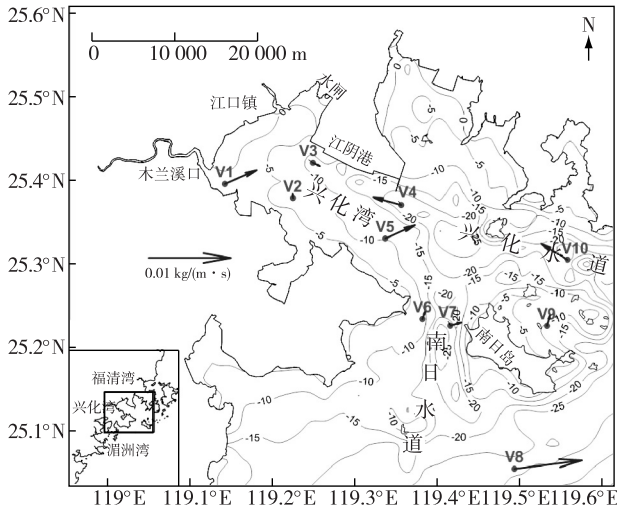


图3 各测点 T_1 输沙量及输沙方向

Fig. 3 Flux and direction of T_1 at gauge stations

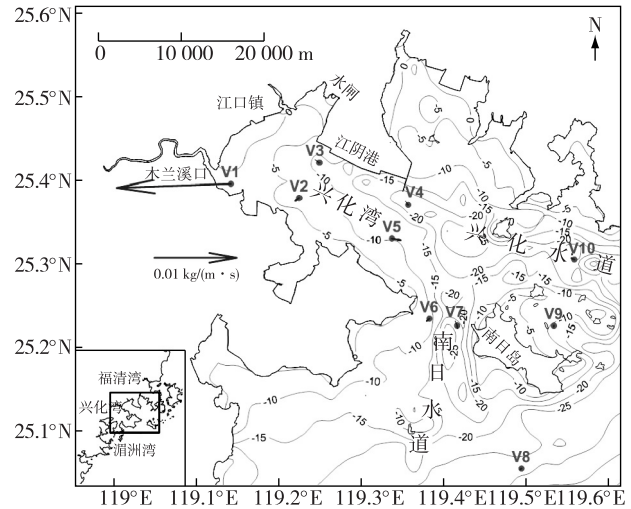


图4 各测点 T_2 输沙量及输沙方向

Fig. 4 Flux and direction of T_2 at gauge stations

由表1、表2、图3可知,因为处于河口位置的 V_1 站潮周期平均含沙量最大,故 V_1 站 T_1 最大,方向沿落潮方向,表明下泄径流对 V_1 站的水沙输运有重要影响。对于湾内位置的 $V_2 \sim V_5$ 站,由于水深差异,靠近湾顶的 V_2, V_3 站的 T_1 远小于湾口深水区的 V_4, V_5 站, V_2 和 V_3 站 T_1 输运方向相反, V_4 与 V_5 站 T_1 输运方向也相反,径流作用、地形与流速差异是产生这种现象的主要原因: V_2 和 V_3 站靠近径流与潮动力剧烈作用的湾顶位置,如图5(a)木兰溪下泄的径流流向为东北方向, V_2 站的优势流(涨潮流)在径流顶托下向北偏转; V_3 站受到木兰溪与上游河闸下泄水流的影响,落潮流速明显大于涨潮流速,使得 T_1 向落潮方向输移; V_4 与 V_5 站径流作用减弱,由图5(b)可知, V_4 站位于靠近江阴港的深槽位置,涨潮平均流速远大于落潮平均流速,说明 V_4 站为涨潮优势流, T_1 沿着主槽向涨潮方向输运; V_5 附近潮滩众多,使得束水归潮的落潮流速大于漫滩扩散的涨潮流速, T_1 沿着深水区向深槽输移。 V_6, V_7 站为涨潮优势流,所以 T_1 的输移方向接近涨潮平均流向湾内偏兴化水道方向输移。处于兴化水道深槽位置的 V_{10} 涨潮流占优, T_1 的输移方向接近涨潮流向沿着兴化水道深槽向湾内输移;如图5(d), V_9 站位于右岸浅滩且测点附近岛礁众多,受到岛礁阻挡和地形的多变,导致 V_9 站附近流场发生不规则变化,使得 T_1 垂直向兴化水道深槽输移。

T_2 大小体现了潮汐与潮流的相关性,与平均含沙量线性相关,表1、表2和图4总体呈现如下特点:(1)深水区的 $V_4, V_7, V_8, V_9, V_{10}$ 站 T_2 比 T_1 小至少1个量级;(2)浅水区斯托克斯输沙相当明显,尤其是河口的 V_1 站和湾顶的 V_2 站, T_2 占总输沙的比重远大于其他输沙项, V_5, V_6 站的 T_2 也占有较大比重,表明浅水区流速变化与水位变化的相关性相对于深水区更加明显。

由表1可见,各测站的 T_1, T_2 在总输沙中占有较大比重,表明平流输沙对悬沙净输移贡献显著。深水区平流输沙主要受 T_1 控制,而浅水区受 T_2 影响更强, V_1 站的平流输沙沿着涨潮方向主要原因是上游木兰溪及狄芦溪均为小河流,测量期间流量很小导致了径流作用弱于潮流。

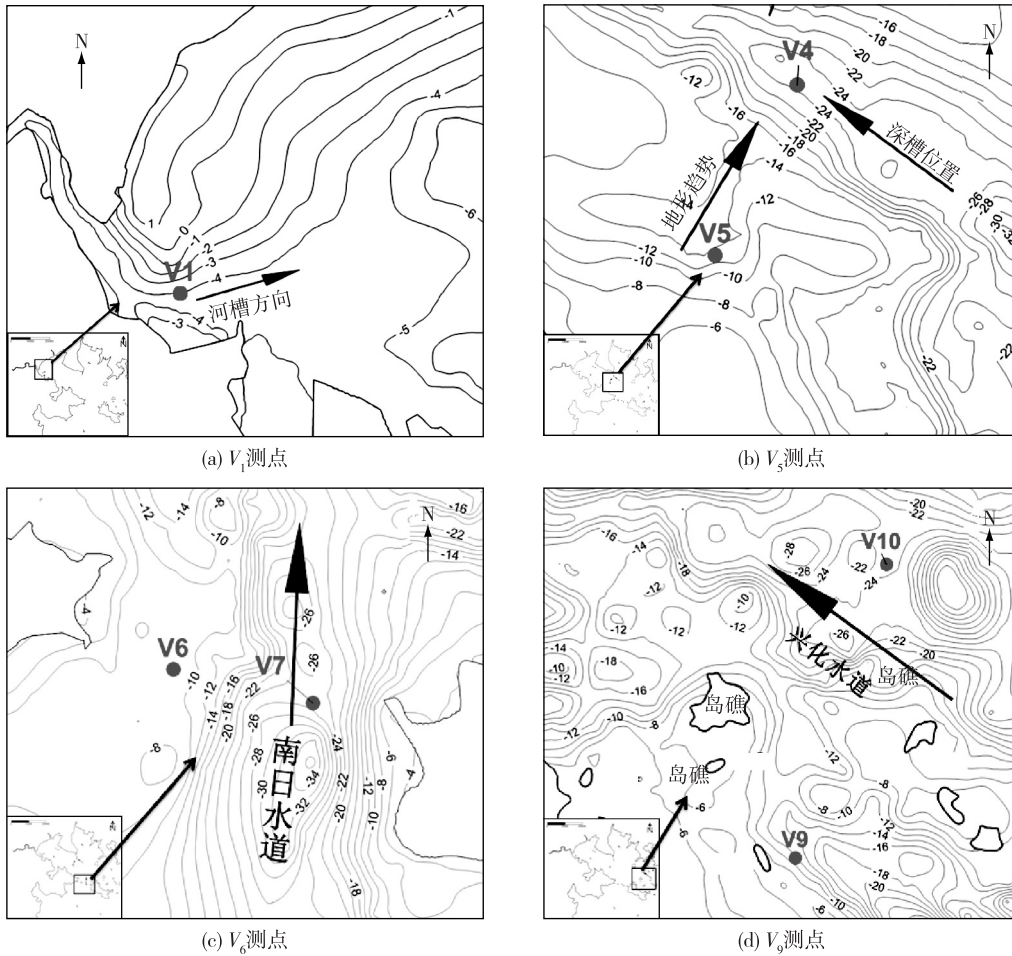
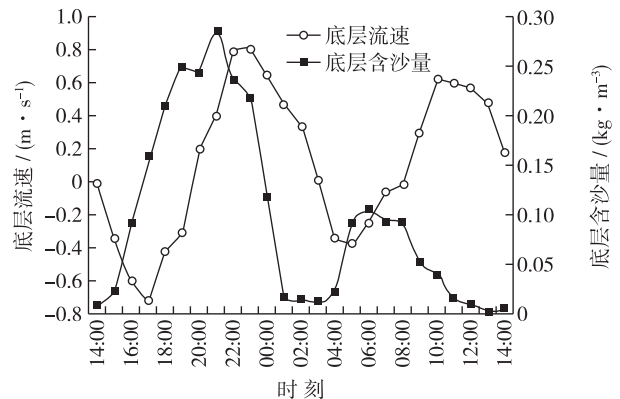


图 5 测点附近地形

Fig. 5 Topography near gauge stations

4.2 潮泵效应输沙

涨落潮的挟沙强度不同,导致底部泥沙在交换过程中产生潮周期尺度内的不对称输移,并因滞后效应使得悬沙浓度与流速变化的时间过程存在一定相位差,涨落潮的悬沙输移不能相互抵消,产生净输沙,即潮泵输沙。由表 1 可知,潮泵输沙以 T_4 为主,表明悬沙浓度变化很大程度上受潮流流速变化的影响,且深水区各站的 T_3 , T_4 项占总输沙的比重远小于其他输沙项,主要由背景含沙量低所导致。浅水区的 V_1, V_2, V_3 站, T_3, T_4 项占总量的比重较大,通过 V_1, V_2, V_3 站底层流速的纵向分量与底层含沙量的对应关系(图 6~7)可以看出,在 1 个潮周期内 V_1 站底层泥沙出现两次再悬浮,最大含沙量出现在涨急时刻附近,并且在整个涨潮期间都保持较高的悬沙浓度,落潮期间,底沙再悬浮量明显少于涨潮期间,导致 V_1 站向海悬沙输移量小于向陆悬沙输移量,从而导致底层泥沙在潮周期尺度内沿涨潮方向产生潮泵净输沙。 V_2, V_3 站的含沙量比 V_1 站低 1 个量级以上, V_2 站在 1 个潮周期期间含沙量均维持在相对较高水平,整体来看,涨

图 6 V_1 站纵向底层流速和底层含沙量过程线Fig. 6 Phase relationships between velocities and sediment concentrations at bottom along longitudinal direction of V_1 gauge station

潮时段底层含沙量浓度高于落潮时段,产生接近涨潮方向的净输沙;而 V_3 站落潮时段底沙再悬浮量高于涨潮时段,这是 V_3 站沿落潮方向产生潮泵净输沙的原因。

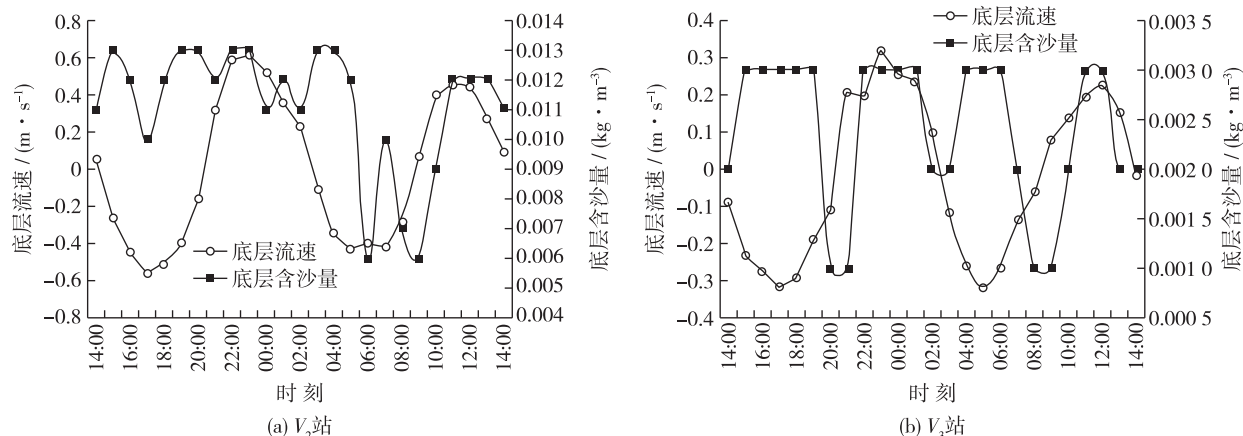


图7 V_2, V_3 站纵向底层流速和底层含沙量过程线

Fig. 7 Graphs of velocities and sediment concentrations at bottom along longitudinal direction of V_2 and V_3 gauge stations

4.3 垂向净环流输沙

余流方向和强度在垂向各层的不一致和含沙量垂向不均匀分布导致了潮周期内各层输沙量不能相互抵消,产生垂向净环流的输沙。垂向余环流的强弱可用垂向余流结构图表示,同时用垂向各层含沙量均值表现悬沙浓度垂向变化强度,进而探讨垂向净环流的输沙机理。

由表1可知, T_5 在总输沙中的比重很大,在有些测站甚至大于 T_1, T_2 ,表明垂向环流输沙对悬沙的净输移贡献显著。图8为各测站垂向余流结构。

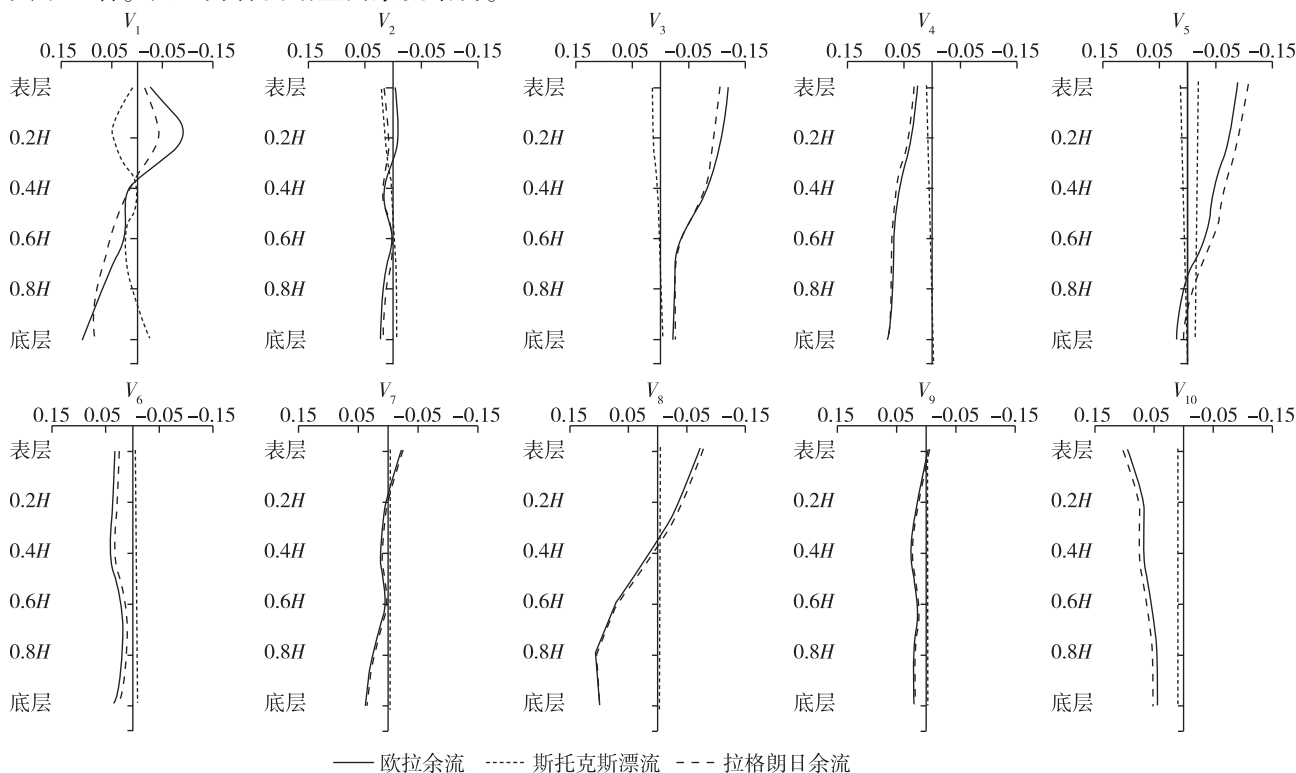


图8 各测站垂向余流结构图(单位: m/s)

Fig. 8 Vertical residual current structures at gauge stations (unit: m/s)

由图 8 可知,欧拉余流垂向上的变化表征各层优势流的输移方向。处于湾顶位置的 V_1, V_2 站在径流、风海流等动力因子与潮流剧烈作用下,反映在垂向各层余流方向的不一致,表层落潮向的动力因子占优,而中下层潮流优势明显,余流沿涨潮方向,因此,两站均存在明显的欧拉余环流;处于南日水道的 V_6, V_7 站,如图 5(c) 所示,底部地形突然狭窄与断面形状是造成 V_7 站表底层流速大小方向出现较大差异的主要原因;外湾深水区位置的测站,周期性潮动力为主要动力,表现为表底层的余流方向基本一致。除 V_1, V_2 站外,其余各站的斯托克斯余流远小于欧拉余流,总体上欧拉余流起控制作用。

表 3 为各测站各层含沙量均值,以底、表层含沙量比值反映含沙量在垂向上的梯度变化程度。由表可知,浅水区的 V_1, V_2, V_3 站和南日水道的 V_6, V_7 站,底、表层含沙量比值最小,也印证了河口浅水区潮流与径流强烈作用,悬沙各层混合均匀;深水区各站底、表层含沙量比值较大,由于远离河口受径流输移的泥沙影响小,且较大的水深使得底层泥沙难以被掀起到达表层,导致整体含沙量较低,水动力作用较弱导致了泥沙的垂向混合作用较弱,上层泥沙容易沉降到底层,最终造成含沙量垂向变化明显。

表 3 垂向各层含沙量均值

Tab. 3 Vertical distribution of tidal-averaged suspended sediment concentration ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

	表层	0.2H	0.4H	0.6H	0.8H	底层	底层/表层
V_1	/	0.082	/	0.082	0.097	/	1.18
V_2	0.007	0.008	0.007	0.008	0.009	0.011	1.57
V_3	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	1.56
V_4	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	3.41
V_5	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.005	2.67
V_6	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	1.70
V_7	0.002	0.003	0.002	0.002	0.003	0.004	1.91
V_8	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	3.94
V_9	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	3.66
V_{10}	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	1.68

5 地形变化对净输沙的响应

图 9(a) 为兴化湾西部浅滩地形变化,可以看出,木兰溪河口以东的兴化湾西部浅滩多年来等深线呈向外海淤积推进之势,不断向外扩展。对照泥沙净输移矢量图 2,其与 V_1 站的输沙方向相对应,该区域上游的木兰溪挟沙向外海方向输移,当进入湾内后径流动力变弱,潮流成为悬沙输移主要动力因子,悬沙向湾顶向净输移,在此形成淤积。

图 9(b) 为兴化湾北部深槽地形变化,可以看出江阴半岛前沿的兴化湾深槽等深线向东有一定后退,江阴壁头南侧近岸浅滩等深线基本吻合,这与图 2 泥沙净输移结果吻合。该区域潮流净输沙向湾内输移,增加湾内淤积,但因其净输沙量小,泥沙供给有限,地形基本处于冲淤平衡状态。

对比图 9(a) 和 9(b) 可见,河口湾顶附近的地形变化远大于湾内深槽,这与上述河口区净输沙量高于湾内其他区域分析结果相符,而湾内深槽海域净输沙量低,泥沙供给有限,地形变化较小,因此认为造成海湾地形变化的主要原因是陆源泥沙。

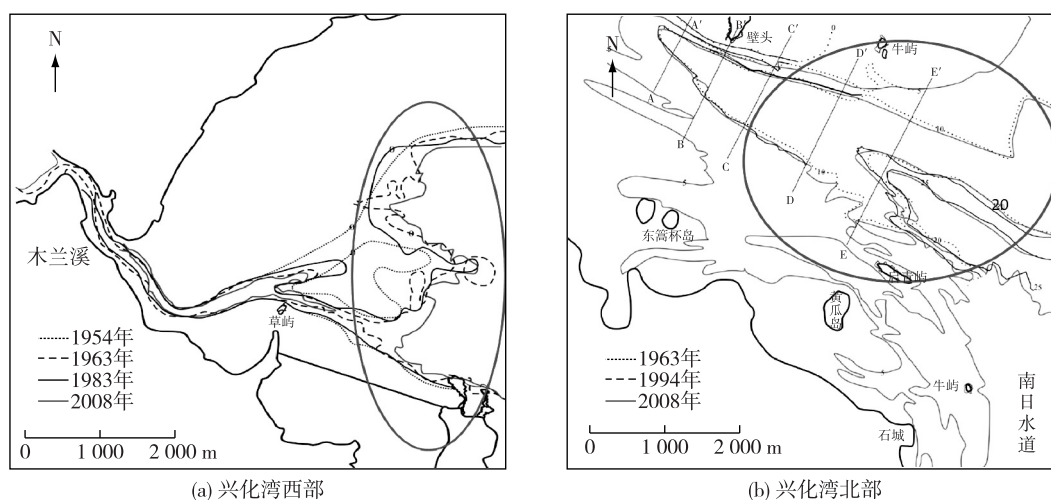


图9 兴化湾西部和北部深槽地形变化

Fig. 9 Changes of topography in deep trough of west and north Xinghua bay

6 结 语

(1) 外海泥沙沿兴化水道与南日水道向湾内输移,但由于兴化湾的泥沙来源有限,水体含沙量低,对湾内淤积产生的影响较小。

(2) 平流输沙对悬沙的净输移贡献显著。深水区平流输沙主要受 T_1 控制,而浅水区受 T_2 影响更强。

(3) 潮泵输沙占总输沙的比例小于平流输沙和垂向净环流输沙,潮泵输沙以 T_4 为主,由于背景含沙量低,所以深水区各站的潮泵输沙量很小。

(4) 河口浅水区垂向各层余流方向不一致,悬沙各层混合均匀;深水区表底层的余流方向基本一致,欧拉余流起控制作用,含沙量垂向变化明显;水深相对较大的区域主要受平流输沙的控制而浅水区垂向净环流输沙影响更强。

(5) 潮流输沙造成湾顶附近淤积,且湾顶附近地形变化远大于湾内深槽,造成海湾地形变化的主要原因是陆源泥沙。

参 考 文 献:

- [1] 童朝锋,王俊杰,张青. 兴化湾潮汐潮流特性及工程影响分析[J]. 水利水运工程学报, 2015(1): 53-60. (TONG Chao-feng, WANG Jun-jie, ZHANG Qing. Tidal regime and impacts of works in Xinghua bay on hydrodynamics[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(1): 53-60. (in Chinese))
- [2] 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 De-an, ZHANG Ren-shun, YAN Yi-xin, 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))
- [3] BOWDEN K F. The mixing processes in a tidal estuary[J]. International Journal of Air and Water Pollution, 1965, 7: 343-356.
- [4] FISHER H B. Mixing and dispersion in estuaries[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1976, 8: 107-133.
- [5] UNCLES R J, ELLIOTT R C A, WESTON S A. Dispersion of salt and suspended sediment in a partly mixed estuary[J]. Estuaries, 1985, 8: 256-269.
- [6] 陈建勇,戴志军,陈吉余,等. 杭州湾北岸弧形岸段悬沙净输移分析——以龙泉—南竹港岸段为例[J]. 泥沙研究, 2009(2): 53-59. (CHEN Jian-yong, DAI Zhi-jun, CHEN Ji-yu, et al. Analysis of the net sediment transportation along arc-shaped coast in the northern bank, Hangzhou bay—a case study of Longquan-Nanzhu harbor segment[J]. Journal of Sediment Research,

- 2009(2): 53-59. (in Chinese))
- [7] 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 Xiao-dong, YAO Yan-ming, JIANG Guo-jun, et al. Study on the transport mechanism of suspended sediment in Yueqing bay[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(1): 53-59. (in Chinese))
- [8] 闫新兴, 刘国亭. 福建兴化湾近岸地貌特征与泥沙来源分析[J]. 水道港口, 2012, 33(6): 469-474. (YAN Xin-xing, LIU Guo-ting. Analysis of geomorphic characteristics and sediment source of near-shore area in Xinghua bay[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2012, 33(6): 469-474. (in Chinese))
- [9] 李孟国. 兴化湾水文泥沙特征分析[J]. 水道港口, 2001, 22(4): 156-159. (LI Meng-guo. Hydrographic and sediment analyses of Xinghua bay[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2001, 22(4): 156-159. (in Chinese))
- [10] 万新宁, 李九发, 何青, 等. 国内外河口悬沙通量研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(6): 864-869. (WAN Xin-ning, LI Jiu-fa, HE Qing, et al. Review of suspended sediment flux in the world[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(6): 864-869. (in Chinese))
- [11] 胡日军. 舟山群岛海域泥沙运移及动力机制分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. (HU Ri-jun. Sediment transport and dynamic mechanism in the Zhoushan archipelago waters[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. (in Chinese))
- [12] 冯凌旋, 李占海, 李九发, 等. 基于机制分解法长江口南汇潮滩悬移质泥沙通量研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(8): 944-950. (FENG Ling-xuan, LI Zhan-hai, LI Jiu-fa, et al. Flux of suspended sediment in the Nanhui tidal flat of the Yangtze estuary with mechanism decomposition method[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(8): 944-950. (in Chinese))

Mechanism of suspended sediment transport in Xinghua bay

TONG Chao-feng, ZHENG Lian-xiao, MENG Yan-qiu, SHI Jian

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the calculation of the tide and sediment data measured in the Xinghua bay by use of the mechanism decomposition method, the characteristics of the suspended sediment transport in the Xinghua bay have been illustrated through exploring the mechanism of the advection, tidal pumping effects and the vertical circulation for sediment transport, and the impacts of the sediment transport on the topographic changes in the study area have been discussed in this paper. The analysis results show: offshore-sediment moves toward the inner of the bay along the Xinghua and Nanri channels under the action of tide, but it has little influence on the sedimentation in the inner of the bay. The advection and the vertical circulation are the primary factors for the suspended sediment transport, and the sediment transport in the deeper region is mainly controlled by the advection while the vertical circulation has a stronger impact in the shallow regions. The sediment transport under tidal pumping effect is dominated by the correlation between the suspended sediment and the tidal current, which is less than the sediment transport caused by the advection and the vertical circulation. The residual current directions are inconsistent in different vertical layers in the shallow estuary region, which causes the suspended sediment to mix well. The directions of the residual current in the surface and bottom layers are basically the same in the deeper region, and the vertical sediment concentration changes significantly. The deposition in the top of the bay is caused by the sediment transport. The main cause of the changes in the gulf topography is terrigenous sediment.

Key words: mechanism decomposition method; suspended sediment transport; advection sediment transport; tidal pumping; vertical circulation