

洋山港海域潮动力特征及其对工程的响应

杨忠勇, 程和琴, 朱建荣, 李身铎

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 距上海陆域外约 32 km 的洋山港是以小洋山岛链为基础建造的中国首个离岸式深水港口, 其港区陆域是通过封堵北岛链三个主要汉道并抛填成陆而成。大规模的封堵陆连工程改变了该海域的地形边界条件, 海域潮动力特征也随之响应。通过对洋山港海域堵汉陆连工程前后潮位及潮流实测资料的分析研究, 发现洋山港海域的潮动力特征主要表现在: 海域潮波倍潮及复合潮增幅随工程的进行而增大, 潮动力表现出明显的非线性特征; 海域中部发生壅水; 海域潮波向驻波性质变异并于憩流时段引发环状流场。

关键词: 洋山深水港; 潮动力; 非线性特征; 壅水; 驻波

1 引言

为满足上海建设国际航运中心的需求, 在离岸 30 km 外的洋山海域辟建的上海洋山港是中国首个离岸式深水港口。工程前洋山港海域由北侧小洋山岛链与南侧大洋山岛链围成一个形似喇叭状的潮汐通道。西口门喇叭口处宽约 8.1 km, 朝向杭州湾, 至东逐渐缩窄, 东口门最窄处仅约 0.9 km。自然状况下, 流经该海域的潮流虽受各岛屿的阻扰, 但岛屿间狭道众多, 潮流甚为通畅。洋山港汉道封堵陆连工程开始于 2002 年 4 月, 先后封堵了大乌龟—一颗珠山、小洋山—镬盖塘、将军帽—大指头岛北岛链三个主要汉道, 最后实施北港区抛填成陆工程, 水工部分竣工于 2006 年 10 月。工程后北岛链大部分出水汉道被封堵, 北岛链被围成一形似长方形的陆域, 且在其南沿形成一长达 5.7 km 的顺直岸线 (图 1), 将海域围成一自西向东逐渐束窄、水深逐渐加深的喇叭口状潮汐通道。

洋山海域的水动力主要来自于西北太平洋传入的大洋潮波及长江口外泄径流^[1]。港区海域西宽东窄的平面形态致使海域水动力具有明显的狭道效应^[2], 这使得海域东部保持良好的水深, 同时也导致宽且浅的西部海域发育与长江口类似的滞留区^[3]。窄而深的东部海域底层余流还因狭道效应发生明显的汇聚与分离现象^[4]。海域内泥沙的输运和沉积与长江口下泄的大量泥沙相关^[1], 但本海域岛屿的风化沉积物也是海域中重要的沉积源^[5-6]。近百年来, 海域总体呈现微淤状态, 平均淤积速率约 2.3 cm/a, 这主要源于长江口巨量的下泄泥沙^[7], 但近约 40 年来, 海域逐渐转为微冲环境^[8]。自 2002 年来, 随着北岛链一系列堵汉陆连工程的进行, 海域的水动力, 含沙量乃至地形都为之发生较大变化^[9-12]。基于上述研究, 本文期望在工程前后潮位及潮流实测数据基础上, 从潮动力的非线性特征、潮波的驻波性质及壅水三个方面对洋山港海域的潮动力特征及其对工程的响应进行讨论。

收稿日期: 2012-05-05; 修订日期: 2012-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40776056); 国家科技部中—荷合作项目 (40976055); 华东师范大学研究生院海外访学研修资助办 [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40776056; Ministry of Science and Technology of China for Cooperation Program of China and Netherlands, No.40976055; Department of Overseas Training and Visiting of East China Normal University]

作者简介: 杨忠勇 (1984-), 男, 博士研究生, 主要从事河口海岸工程地貌与环境研究。

E-mail: ayong0710@163.com

通讯作者: 李身铎 (1938-), 男, 教授, 主要从事河口海岸工程地貌与环境方面的研究。E-mail: lliisd@163.com

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本文使用的潮位数据主要来自小洋山永久潮位站(图1)自记水位计观测资料,资料时限为1999-2007年,即从堵汉工程进行前至北岛链工程完成后,观测频率10分钟,本文取整点时刻潮位值进行分析。另外,在大乌龟和小岩礁前沿水域分别设立临时水位观测站,观测时间为2005年7月4日至7月7日和2008年5月5日至5月8日,共6个潮周期,观测频率为1小时。

潮流数据采自洋山港海域4个横断面的声学多普勒流速剖面仪(ADCP, 300 kHz)走航观测资料,4个横断面(ADCP-13, ADCP-12, ADCP-14, ADCP-16)长度分别为 $L_{ADCP-13} = 7000\text{ m}$, $L_{ADCP-12} = 4000\text{ m}$, $L_{ADCP-14} = 2500\text{ m}$, $L_{ADCP-16} = 900\text{ m}$ (图1)。共有大、小潮2次观测,持续分别约30小时,其中大潮测量时间为2007年4月19日10:00至4月20日15:00;小潮测量时间为2007年4月25日9:00至4月26日14:00。每个断面的观测资料首先在水平上取100 m间距处的流速流向数据,然后在垂向上先取六分层再将其平均进行分析。

2.2 研究方法

洋山港海域潮动力的非线性特征采用海域中潮汐的半日分潮振幅(H_{M_2})、倍潮振幅(H_{M_4})、复合潮振幅(H_{MS_4})以及潮流的半日潮流振幅(U_{M_2})和倍潮流振幅(U_{M_4})等潮汐潮流特征值的对比分析获得。潮汐特征值(H_{M_2} 、 H_{M_4} 和 H_{MS_4})通过小洋山站潮位资料的调和与分析获得,潮流特征值(U_{M_2} 和 U_{M_4})通过洋山海域四个ADCP观测断面上大小潮两次观测数据调和与分析获得。文中所采用潮流特征值数据来自两次观测数据调和与分析的平均值,且本文仅考虑潮流的东西分量。壅水现象采用洋山港海域北岛链自西向东3个潮位站(大乌龟,小洋山,小岩礁,图1)涨、落急时刻潮位值的对比分析获得,其中的水位壅高值为小洋山站潮位值与大乌龟和小岩礁两站潮位平均值之差值。岸线对潮波的反射作用促使潮波向驻波性质变异,可用潮波运动的相位差表述。潮波运动相位差通过海域中4个ADCP断面上涨、落憩发生时间与小洋山潮位站高、低平潮位出现时间之差值计算获得(大、小潮两次观测结果的平均值)。

3 研究结果

3.1 潮动力的非线性特征

潮汐通道中潮动力的非线性特征主要表现在潮波的倍潮(如 M_4 、 M_6 等)或复合潮(如 MS_4 等)等振幅的产生或增强,影响因素主要有潮汐通道中急剧变化的平面形态及水深等边界条件^[13-15]。自Lorentz^[16]将水动力控制方程中底摩擦项做线性变换以来,大量的研究分

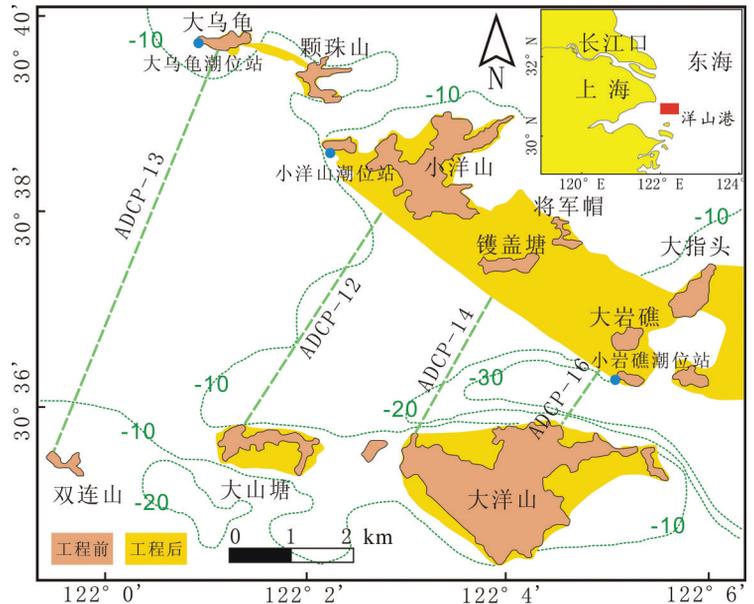


图1 洋山港海域自然概况及测站分布

Fig. 1 The Yangshan Harbor sea area and the observation sites

表1 小洋山潮位站工程前后各分潮振幅变化特征

Tab. 1 Amplitude variation of several constituents in Xiaoyangshan tidal gauge before and after the project

年份	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	变幅 %
平均潮差 (m)	2.67	2.63	2.69	2.70	2.68	2.76	2.74	2.74	2.77	4.14
H_{M_2} (m)	1.25	1.24	1.25	1.25	1.25	1.29	1.30	1.31	1.31	4.80
H_{M_4} (m)	0.053	0.053	0.053	0.056	0.065	0.075	0.081	0.081	0.081	52.2
$H_{M_{S4}}$ (m)	0.045	0.044	0.044	0.046	0.054	0.060	0.064	0.065	0.067	51.9
$(H_{O_1}+H_{K_1})/H_{M_2}$ (F)	0.38	0.38	0.38	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	2.63
H_{M_4}/H_{M_2} (G)	0.043	0.043	0.043	0.045	0.052	0.058	0.062	0.062	0.062	44.2

别基于理想模型和实测资料等对潮汐通道中水动力的非线性特征而展开^[17-19], 分别从解析解和实测资料上获得了不同形态的潮汐通道中潮波运动的非线性特征。潮动力的非线性特征对泥沙的输移及地貌演变有着重要作用, 如在长江口北槽, 潮流的非线性特征使槽内最大浑浊带向海移动^[20]。呈喇叭状潮汐通道的洋山港海域岛屿众多, 水深变化剧烈, 且工程后地形剧变, 潮动力的非线性特征亦表现得非常明显。

工程前 (1999-2001年) 小洋山站平均潮差为2.66 m, 随着工程的进行, 该站平均潮差逐渐增大, 至2007年该站平均潮差增至2.77 m。小洋山站位于北岛链顺直岸线的西北角, 沿海域自东向西传播的潮波在科氏力的影响下向北偏转, 同时受工程后形成的顺直岸线的影响使海水在北岸线附近堆积, 从而使该站平均潮差随着工程的进行而逐渐增大^[21]。另据该站1999年至2007年逐年潮位资料的调和结果 (表1) 显示, 工程前, 小洋山站半日分潮的振幅 (H_{M_2}) 约为1.25 m (1999-2001年), 其倍潮 (H_{M_4}) 和复合潮 ($H_{M_{S4}}$) 振幅分别为0.053 m和0.044 m。工程后 (2007年), H_{M_2} 为1.31 m, 增幅4.8% (0.06 m), H_{M_4} 为0.081 m, 增幅达52.2% (0.03 m), $H_{M_{S4}}$ 为0.067 m, 增幅达51.9% (0.02 m)。表明, 随着北岛链各个汉道的相继封堵, 顺直岸线的形成, 致使小洋山站平均潮差逐渐增大。其中倍潮振幅 (H_{M_4}) 和复合潮振幅 ($H_{M_{S4}}$) 的增幅远大于半日分潮振幅 (H_{M_2}) 的增幅, 海域潮动力特征的非线性特征加强。

根据潮汐性质判据, 该海域半日潮性质判据 $F = (H_{O_1} + H_{K_1})/H_{M_2}$ 工程前为0.38, 工程后略增至0.39, 变化甚小, 工程前后均为非正规半日潮。浅水分潮判据 $G = H_{M_4}/H_{M_2}$ 在工程前为0.043, 工程后增至0.062, 增幅达44.2%, 表明受海域急剧变化的地形等边界条件的影响, 工程前后海域浅水分潮性质均较强, 另外, 工程后G值的大幅度增加表明工程对海域地形的较大改变致使海域浅水分潮性质进一步增强, 潮动力的非线性特征进一步显现。

洋山海域潮波运动的非线性特征还受该海域自西向东急剧变化的水深所影响。洋山海域西浅东深, 西部大片海域水深不足10 m, 且变化缓和。向东自小洋山一大山塘间海域开始, 水深超过10 m, 且水深急剧变深, 至东口门最深处达87 m。水深变化对潮波运动非线性特征的影响可从潮汐半日分潮振幅 (H_{M_2}), 倍潮振幅 (H_{M_4}) 及其复合潮振幅 ($H_{M_{S4}}$) 在海域的空间分布来分析。

据洋山海域9个潮位站2008年5月实测资料调和结果^[22]显示 (图2), 海域内半日分潮振幅 (H_{M_2}), 倍潮振幅 (H_{M_4}) 及复合潮振幅 ($H_{M_{S4}}$) 的最大值均出现在海域中央的小洋山及大山塘间海域, 分别约1.32 m, 0.09 m和0.06 m, 往东西方向均逐渐减小, 且向东减小得更加剧烈。半日分潮振幅在东口门约为1.25 m (约减小5.3%), 倍潮振幅在东口门约0.06 m (约减小33%), 复合潮振幅在东口门约为0.04 m (约减小33%)。可见, 无论是 M_2 分潮振幅还是 M_4 和 M_{S4} 分潮振幅在港区的分布, 最大值均出现在小洋山与大山塘间的海域, 而并非发生在平面形态急剧缩窄的东口门。这表明虽然自西向东, 随着侧边界的缩窄, 波能逐渐汇聚, 但由于水深的逐渐增加, 波能也易于通过增加下层水体的动能而逐渐耗散。相反地, 在小洋山与大山塘两岛之间虽不是岸线最为束狭的区域, 但因水深较浅, 波能汇聚, 而致使半日分潮及其倍潮和复合潮振幅出现最大值。

洋山港海域4个 ADCP 断面上潮流流速2007年观测值的调和分析结果显示,半日分潮流振幅(U_{M_2})的最大值出现在海域中央(图3a),约为1.0~1.2 m/s,受岸线对潮流的摩擦力的影响,最小值出现在海域两岸区域,约0.5~0.9 m/s。倍潮流振幅(U_{M_4})则呈现海域中央低于两岸的现象(图3b),即最小值出现在海域中央,约0.05~0.1 m/s,最大值出现在海域两岸区域,约0.15~0.2 m/s。这种在南北两侧受岸线影响的海域,半日潮流振幅减小,而倍潮流振幅增大的现象表明,海底地形边界及侧边界对潮流的摩擦效应使得海域近岸区域潮流的非线性特征远大于海域中央。

3.2 驻波

工程后,北岛链顺直岸线的形成对洋山港海域潮波的反射作用将导致该海域潮波向驻波性质变异,且离岸越近的区域驻波性质越明显,反之,海域中央则更趋近于前进波性质,这种相邻海域潮波性质的不一致性是海域潮泵效应致余输沙的主要因素^[23-24]。例如在北支,潮泵效应被认为是其悬沙向陆输移的主要因素^[25]。潮波的驻波性质可用潮流转流发生时间与当地高(低)平潮位发生时间的相位差来分析。若潮波为前进波,则潮流转流将发生在当地高(低)平潮位后约3.1小时(约186分钟),而对于驻波潮流转流将和高(低)平潮位同时发生^[26-27]。为揭示整个海域潮波性质的变化和分布,本文以小洋山站潮位观测为准,对洋山海域中4个ADCP断面上潮流与小洋山站潮位的相位差进行统计分析(图4)。

涨憩时段(亦即涨潮流转为落潮流时段),海域中央水域转流时间一般发生在小洋山高平潮位后约90分钟(图4),而岸线前沿海域转流则一般发生在其高平潮位后30分钟,表明距离岸线越近的海域,潮波驻波性质越明显,反之,海域中央潮波则更趋向于维持其前进波性质。落憩时段(亦即落潮流转为涨潮流时段),北岸线前沿海域转流时间一般发生在小

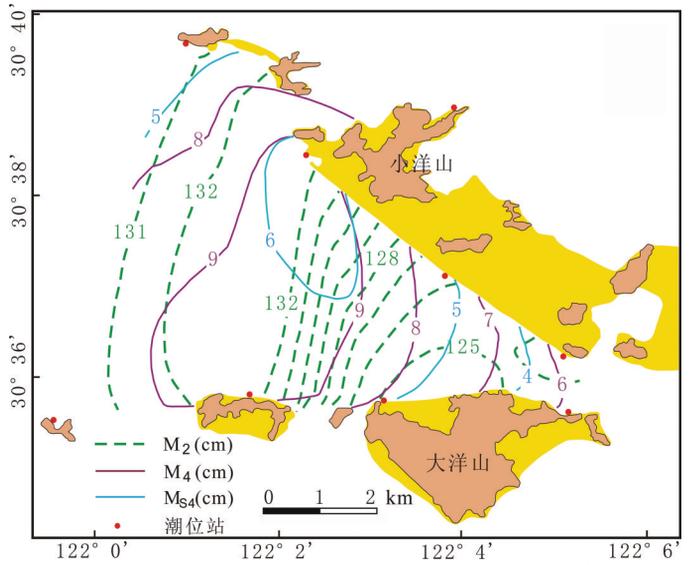
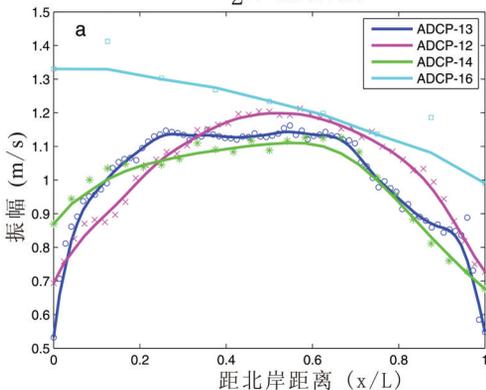


图2 洋山港海域工程后 M_2 、 M_4 及 M_{S4} 分潮振幅分布^[22]

Fig. 2 Tidal level amplitude distributions of M_2 , M_4 and M_{S4} in Yangshan Harbor sea area (after the project)^[22]

M_2 分潮振幅



M_4 分潮振幅

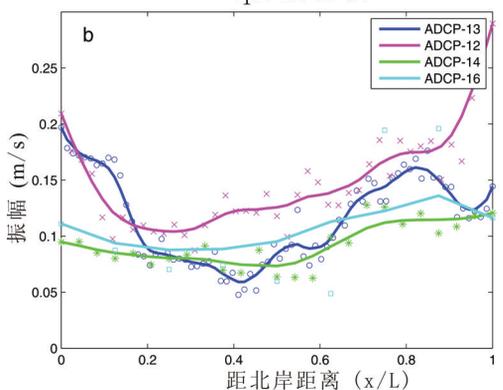


图3 洋山港海域工程后横断面 M_2 (a) 及 M_4 (b) 分潮流振幅分布

Fig. 3 Tidal flow amplitude distributions of M_2 (a) and M_4 (b) in the Yangshan Harbor sea area (after the project)

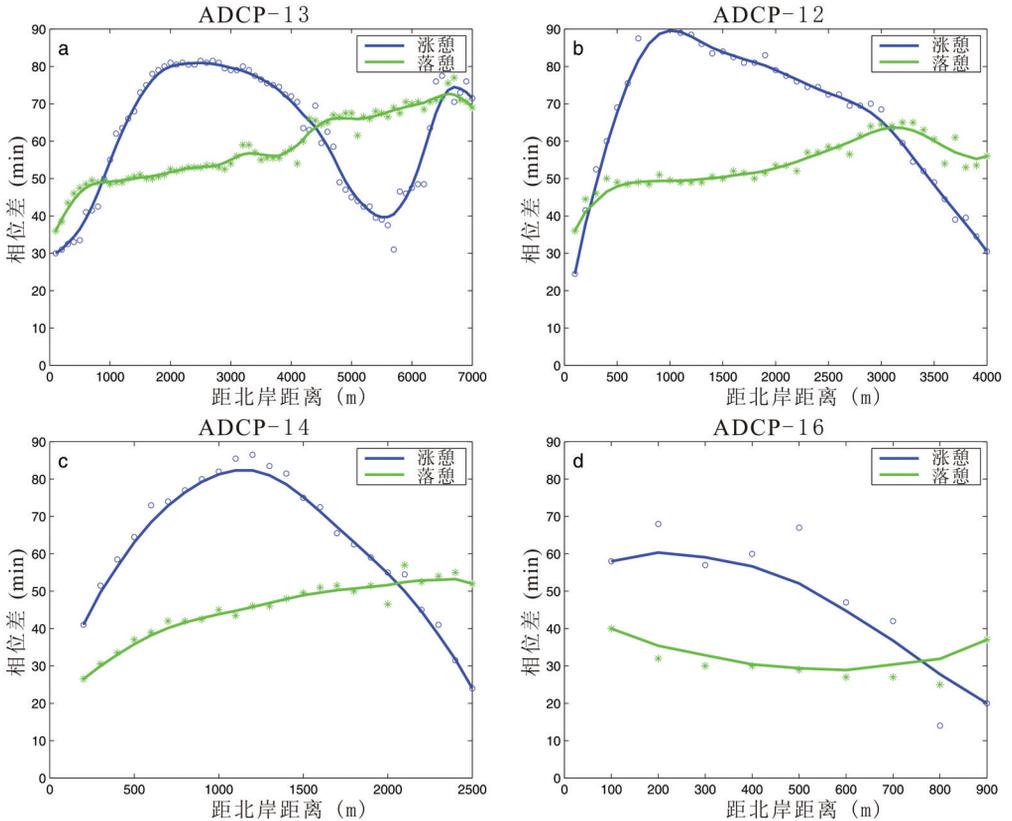


图4 洋山港海域工程后横断面潮波相位差分布

Fig. 4 Phase difference distributions in the Yangshan Harbor sea area (after the project)

洋山低平潮位后 30 分钟, 随着距离北岸线越远, 转流发生时间越落后, 最迟发生转流的区域在南岛链前沿水域, 表明距离北岸线越近的海域潮波的驻波性质越强。同时也可以看出, 潮波涨憩时段的相位差与落憩时段的相位差有较大的不一致性。涨憩时段, 水体由狭窄的东口门进入港区, 宽阔的西口门泄出, 因此海域中央潮波受岸线反射的影响小, 而近岸区域则受其较大影响, 因此, 转流的发生由两岸向海域中央进行。落憩时段, 大量水体由宽阔的西口门进入港区, 潮波运动方向与北岛链顺直岸线有较大交角, 因此, 整个海域潮波均受北岛链顺直岸线反射的影响, 表现出离北岛链岸线越近的海域, 潮波驻波性质越明显的现象, 转流的发生由北而南逐渐进行。值得说明的是, 在上述 4 个 ADCP 断面中, 由于西口南端 (ADCP-13) 存有较大汉口, 东口门 (ADCP-16) 极窄而水深变化剧烈, 因此情况略有差异。

由以上分析知, 洋山海域内不同区域的潮波表现出不同程度的驻波性质, 这同时将导致海域内不同区域潮流转流发生时间的不一致性, 从而在转流时段产生短暂性的环状流场。这种环状流场虽然历时较短, 但流速较弱, 泥沙易于落淤, 对海底地貌形态有重要影响^[28]。根据工程后 (2007 年 4 月) 洋山海域 4 个 ADCP 横断面上实测潮流资料绘制的同潮流矢图显示, 在涨憩时段, 当主通道中央海域仍为涨潮流时, 北岛链岸线前沿已率先转为落潮流, 港区海域形成顺时针环状流场 (图 5a)。在落憩时段, 当主通道海域仍为落潮流时, 港区北岸线前沿水域已率先转为涨潮流, 港区海域形成逆时针环状流场 (图 5b)。同时也可以看出, 由于北岸线对涨落潮阶段潮波反射效果的不一致, 涨、落憩流阶段出现的环状流场形状也不一样。涨憩时段, 由于转流的发生由海域两岸向中央进行, 因此当北岸线前沿区域已转为落潮流时, 海域中央仍存有较强的涨潮流, 在海域的北半部分出现顺时针环

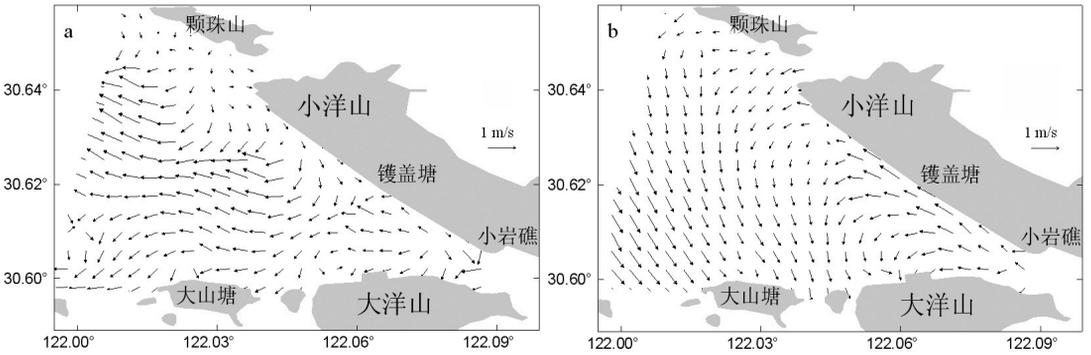


图5 洋山港海域工程后涨憩 (a) 及落憩 (b) 时段流场

Fig. 5 Flow field in flood slack (a) and ebb slack (b) period in the Yangshan Harbor sea area (after the project)

状流场。落憩时段，由于转流的发生自北而南进行，因此，整个海域出现逆时针环状流场。

3.3 壅水

由3.1节中讨论知，潮波波能在小洋山与大山塘间海域因水深急剧变浅而发生汇聚，各分潮振幅在此出现最大值，这在宏观上还表现为壅水现象。英晓明^[22]通过数值模拟显示，在工程后的涨急阶段，在小洋山前沿海域出现壅水，落急阶段在小洋山与大山塘间大片海域出现壅水，并认为这是洋山港致淤的主要因素。本文拟通过北岛链大乌龟、小洋山和小岩礁三个潮位站分别于2005年7月和2008年5月为期6个潮周期的潮位观测资料统计分析来揭示壅水现象。2005年7月北岛链大乌龟—一颗珠山汊道及小洋山—镬盖塘汊道已被封堵，2008年5月北岛链水工部分工程已全部竣工。

据2005年7月北岛链大乌龟、小洋山和小岩礁3个潮位站6个潮周期观测资料统计分析显示(表2)，三潮位站涨急阶段的潮位值自东向西均逐渐下降，未显现壅水现象；落急阶段则显现出明显的壅水现象，中部小洋山站潮位较东西两站平均壅高约0.16 m，最大值达0.22 m。表明因海域地形自西向东的缩窄形态，落潮阶段由于水流外泄不畅，已形成较为明显的壅水现象。

据2008年5月上述3个潮位站6个潮周期内观测资料统计分析显示，涨急时段，中部小洋山站潮位较东西两站平均壅高约0.14 m，最大值达0.17 m；落急时段，中部小洋山站潮位较东西两站平均壅高约0.23 m，最大值达0.30 m。表明工程后，涨落潮阶段洋山海域均发

表2 洋山港海域北岛链三个潮位站涨、落急时刻潮位

Tab. 2 Tidal level of maximum flood and ebb in three tidal gauges in north island chain of Yangshan Harbor sea area

年	时间 月-日-时	涨急时刻潮位 (m)			水位 壅高	时间 月-日-时	落急时刻潮位 (m)			水位 壅高
		大乌龟	小洋山	小岩礁			大乌龟	小洋山	小岩礁	
2005	7-5-09	3.06	3.10	3.19	—	4:00	1.43	1.52	1.49	0.06
	7-5-22	4.31	4.35	4.37	—	14:00	1.68	1.87	1.73	0.17
	7-6-11	3.42	3.43	3.42	—	3:00	2.22	2.48	2.30	0.22
	7-6-22	4.24	4.28	4.40	—	15:00	1.60	1.75	1.61	0.15
	7-7-10	3.16	3.21	3.32	—	4:00	1.99	2.18	2.01	0.18
	—	—	—	—	—	16:00	1.30	1.48	1.31	0.18
2008	22:00	4.36	4.46	4.35	0.11	3:00	2.05	2.24	1.97	0.23
	10:00	3.64	3.73	3.61	0.11	16:00	0.75	0.87	0.67	0.16
	23:00	4.46	4.59	4.43	0.15	4:00	1.91	2.13	1.87	0.24
	11:00	3.73	3.85	3.67	0.15	15:00	2.16	2.30	2.03	0.21
	23:00	4.25	4.43	4.27	0.17	4:00	2.72	2.97	2.63	0.30
	11:00	3.27	3.42	3.27	0.15	16:00	1.98	2.16	1.86	0.24

育明显的壅水现象。其中,涨潮流阶段的壅水现象是因沿北岸向西的涨潮流流经未封堵的大乌龟一颗珠山汉口时,与经该汉道由岛链北部水域入港的涨潮流相遇,而使水位壅高。落潮流阶段的壅水现象则因北岛链3个主要汉道的封堵导致的水流不畅而发生壅水。

4 结论

(1) 通过1999-2007年小洋山站潮位资料调和和分析的结果表明,随着工程的进行,北岸线的形成,该站平均潮差在科氏力和北岸线的影响下逐渐增大,工程后增加4.14% (0.11 m)。但从各主要分潮振幅的增幅看,半日分潮振幅 (H_{M2}) 增幅约4.8%,倍潮振幅 (H_{M4}) 及复合潮振幅 (H_{MS4}) 增幅均在50%以上。其次,各分潮振幅最大值在空间上分布在小洋山与大山塘海域之间,至东虽岸线急剧束狭,但水深的急剧增加使波能易于耗散使振幅逐渐降低,且倍潮和复合潮降低的幅度远大于半日分潮。据工程后潮流观测值的调和和分析结果显示,海域中央半日分潮流振幅 (W_{M2}) 值 (约1.0~1.2 m/s) 远大于两岸 (约0.5~0.9 m/s),而倍潮流振幅 (W_{M4}) 则呈现海域中央 (约0.05~0.1 m/s) 低于两岸 (约0.15~0.2 m/s) 的现象。因此,本文认为堵汉陆连工程对海域底、侧边界条件的改变引起了海域平均潮位及各分潮振幅的响应,且倍潮和复合潮振幅的变化幅度远大于半日分潮。潮流振幅在海底地形边界及侧边界摩擦效应的影响下表现出半日潮流中央大于两岸,倍潮流两岸大于中央的现象,海域潮动力的非线性特征明显增强

(2) 工程后北岛链形成的顺直岸线对海域潮波的反射作用导致海域潮波进一步向驻波性质变异,并于憩流时段因海域不同区域转流发生时间的不一致性引发短暂的环状流场,且这种现象在涨、落潮阶段表现出不一致性。涨潮时段,水流从狭窄的东口门进入,岸线对水流的影响小,转流由两岸向中央进行;落潮时段,大量水体由宽阔的西口门汇入,岸线对水流影响大,海域转流由南而北进行。

(3) 海域自西向东的汇聚形态使其在落急阶段因大量水体汇入港区而发生壅水现象。北岛链工程中期 (2005年7月),海域中央落急时刻水位壅高约0.16 m,工程结束后 (2008年5月),壅水强度增大,海域中央落急时刻水位壅高约0.23 m。另外,工程后的涨急阶段也发生壅水,其是因两股较强涨潮流在未封堵的大乌龟一颗珠山汉口附近海域相遇而发生,水位壅高约为0.14 m。

致谢: 论文写作过程中,虞志英教授,徐海根教授,李娜和计娜硕士也提出了的宝贵意见,在此一并致谢!

参考文献 (References)

- [1] Xie Wenhui, Chen Shenliang, Gu Guochuan et al. Dynamical characteristics of current and suspended sediment of the Qiqu Archipelago. *Donghai Marine Science*, 2000, 18(2): 1-8. [谢文辉, 陈沈良, 谷国传 等. 崎岖列岛邻近海域的水文泥沙特征. *东海海洋*, 2000, 18(2): 1-8.]
- [2] Chen Shenliang. Hydrodynamics, sediments and strait-channel effects for the Qiqu Archipelago. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(3): 123-130. [陈沈良. 崎岖列岛海区的水文泥沙及其峡道效应. *海洋学报*, 2000, 22(3): 123-130.]
- [3] Li Yuzhong, Chen Shenliang. Similarities between Yangshan Harbor Sea area and the Yangtze Estuary. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(6): 662-670. [李玉中, 陈沈良. 洋山港海域与长江口相似性研究. *地理学报*, 2002, 57(6): 662-670.]
- [4] Li Yuzhong, Chen Shenliang. Separation and convergence of residual flows in Yangshan Harbor area. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, (5): 24-34. [李玉中, 陈沈良. 洋山港海域余流分离和汇聚现象研究. *水利学报*, 2003, (5): 24-34.]
- [5] Yan Xinxing. Analysis of natural conditions and sediment source of Shanghai Yangshan Harbor area. *Journal of Waterway and Harbor*, 2000, (3): 33-36. [阎新兴. 上海洋山港区的自然条件及泥沙来源分析. *水道港口*, 2000, 21(3):

- 33-36.]
- [6] Yan Xinxing, Liu Guoting. On sediment characteristics of water area of Shanghai Yangshan Harbor. *Journal of Waterway and Harbor*, 2003, 24(4): 174-180. [阎新兴, 刘国亭. 上海洋山港水域沉积特征研究. *水道港口*, 2003, 24(4): 174-180.]
- [7] Chen Shenliang. Erosion and accretion characteristics and their causes in the Qiqu Archipelago in the recent century. *Marine Science Bulletin*, 2000, 19(1): 58-67. [陈沈良. 崎岖列岛海区百年冲淤特征及其原因. *海洋通报*, 2000, 19(1): 58-67.]
- [8] Zuo Shuhua, Li Bei, Yang Hua. Analysis on erosion and accretion characteristics in the channel during construction period of Yangshan Harbor. *Journal of Waterway and Harbor*, 2009, 30(1): 14-19. [左书华, 李蓓, 杨华. 洋山港建设时期海域通道冲淤变化特征分析. *水道港口*, 2009, 30(1): 14-19.]
- [9] Yang Zhongyong, Li Na, Yu Zhiying et al. Preliminary research on the impact of blocking branch on the topography of seabed in Yangshan Port. *Marine Science Bulletin*, 2010, 29(2): 166-171. [杨忠勇, 李娜, 虞志英等. 洋山港区堵汊工程对海底地形影响初探. *海洋通报*, 2010, 29(2): 166-171.]
- [10] Zhang Zhilin, Zhu Qiaoyun, Chen Jianmin et al. Influence of blocked bifurcation along Qiqu Archipelago on erosion and sedimentation of sea bed at Yangshan Deepwater Harbor. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010, 27(12): 5-16. [张志林, 朱巧云, 陈建民等. 崎岖列岛堵汊工程对洋山深水港区冲淤影响分析. *长江科学院院报*, 2010, 27(12): 5-16.]
- [11] Zuo S H, Zhang N C, Li B et al. Numerical simulation of tidal current and erosion and sedimentation in the Yangshan deep-water harbor of Shanghai. *International Journal of Sediment Research*, 2009, 24: 287-298.
- [12] Ying X M, Ding P X, Wang Z B et al. Morphological impact of the construction of an offshore Yangshan deepwater harbor in the port of Shanghai, China. *Journal of Coastal Research*, 2012: 163-173.
- [13] Speer P E. Tidal distortion in shallow estuaries [D]. Cambridge University, 1984.
- [14] Speer P E, Aubrey D G. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuary systems (Part 2): Theory. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1985, 21: 207-221.
- [15] Parker B.B. The relative importance of the various non-linear mechanisms in a wide range of tidal interactions (review)//Parker B B. *Tidal Hydrodynamics*. New York: John & Sons, 1991: 237-268.
- [16] Lorentz H A. Calculating the resistance fluctuating of fluid movement. *The Engineer*, 1922, 37: 695. [Lorentz H A. Het in rekening brengen van den weerstand bij schommelende vloeistofbewegingen. *De Ingenieur*, 1922, 37: 695.]
- [17] Friedrichs C T, Madsen O. Nonlinear diffusion of the tidal signal in frictionally dominated embayments. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(C4): 5637-5650.
- [18] Friedrichs C T, Aubrey D G. Tidal propagation in strongly convergent channels. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(15): 3321-3336.
- [19] Niels A. Non-linear tides in Wadden systems: Modelling the effect of mass and momentum transfer between channels and flats [D]. Utrecht University, 2011.
- [20] Jiang Chengjuan. Effects of the deep waterway project on hydrodynamics, sediment dynamics and morphological evolution in the north passage of the Yangtze Estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2012. [蒋成娟. 长江河口北槽水沙过程和地貌演变对深水航道工程的响应[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.]
- [21] Feng Shizuo, Li Fengqi, Li Shaojing. *An Introduction to Marine Science*. Beijing: Higher Education Press, 1999, 195-196. [冯士筵, 李凤岐, 李少菁. *海洋科学导论*. 北京: 高等教育出版社, 1999: 195-196.]
- [22] Ying Xiaoming. The effect of construction of Yangshan Deepwater Harbor on morphological change and mechanism analysis [D]. Shanghai: East China Normal University, 2011. [英晓明. 洋山港建设对海床冲淤演变影响及机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.]
- [23] Jay D A, Smith J D. Residual circulation in shallow estuaries: 2. Weakly stratified and partially mixed, narrow estuaries. *Journal of Geophysical Research* 1990, 95(C1): 733-748.
- [24] Huijts K M H, Schuttelaars H M, de Swart H E et al. Lateral entrapment of sediment in tidal estuaries: An idealized model study. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, C12016, doi: 10.1029/2006JC003615.
- [25] 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. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(2): 84-91. [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. *海洋学报*, 2012, 34(2): 84-91.]
- [26] Wang Baocan, Huang Yangsong. *Hydrodynamics and Morphological Evolution in Coastal Areas*. Shanghai: East China Normal University Press, 1989: 12-14. [王宝灿, 黄仰松. *海岸动力地貌*. 上海: 华东师范大学出版社, 1989: 12-14.]
- [27] Souza A J, Hill A E. Tidal dynamics in channels: Single channels, *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, C09037, doi: 10.1029/2006JC003469.
- [28] Yin J, Falconer R A, Chen Y et al. Water and sediment movements in harbors. *Applied Energy*, 2000, 67: 341-352.

Tidal Dynamics of Yangshan Harbor Sea Area and Its Response to the Project

YANG Zhongyong, CHENG Heqin, ZHU Jianrong, LI Shenduo

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: As the first offshore-port in China, the Yangshan Deep Water Port was set up along the Xiaoyangshan island chain, locating about 32 km away from the mainland of Shanghai. The port is shaped by three main fork channel closures and throw-filling land-making projects. The topography of this area was changed strongly by the large-scale man-made landform projects, which led to the response of tidal dynamics of Yangshan Harbor sea area. According to the observation data of tidal level and tidal flow before and after the project, we found the main tidal dynamics in Yangshan Harbor sea area are as follows. The amplitude of over-tide and compound tide are strengthened due to the project, showing a distinct non-linear effect. Backwater phenomena occurs in the central part of this sea area. The tidal wave shows that standing waves near the landline area cause a weak tidal circulation in the slack tidal period.

Key words: Yangshan deep-water harbor; tidal dynamics; non-linear effect; backwater; standing wave