辐射沙洲地形对南黄海潮汐过程的影响

袁金金, 冯曦*, 冯卫兵

河海大学港口海岸与近海工程学院, 南京 210098

* 联系人, E-mail: xifeng@hhu.edu.cn

2018-01-30 收稿, 2018-05-27 修回, 2018-06-07 接受, 2018-09-14 网络版发表

江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室基金(JSCE506)、卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放课题基金(SOED1609)、国家自然科学基金(51709091)、江苏省自然科学基金(BK20170874)和中央高校基本科研业务费(2017B00514)资助

摘要 利用海岸及大洋环流模型FVCOM三维数值模式模拟了南黄海区域辐射沙洲地形条件下的潮波运动, 并与实测天文潮进行验证, 保证了计算精度. 在相同动力条件下, 又模拟了去除辐射沙洲地形时的南黄海潮波运动情况. 结果表明: 辐射沙洲地形使得潮波波形发生形变, 落潮历时大于涨潮历时, 且越接近近岸这种差异越大, 非线性效应显著; 辐射沙洲地形的存在使得辐射状汉道的流速变大, 均超过1 m/s, 涨潮期和落潮期流速均大于辐射沙洲北部的废黄河口和南部的长江口; 与此同时, 辐射沙洲地形的存在使得该海域潮能通量变大, 加快了潮能耗散, 也使得临界层化参量值向近海移动, 即潮混合锋区向近岸移动. 同时, 伴随着近岸层化参量值变小, 海水掺混在辐射沙洲地区更为严重.

关键词 南黄海, 辐射沙洲, 涨落潮, 潮流流速, 潮能通量, 潮能耗散, 潮混合

潮汐与人们在浅水区的生产生活活动关系重大, 掌握潮汐时间和高低潮时水深是海岸带生产作业、建筑规划的安全保证. 潮涨和潮流还是近岸湿地地貌形成的关键水动力条件. 因此, 研究潮波, 准确把握浅水潮波的特征是非常重要的.

在浅水潮波的相关研究中, 以Parker为代表^[1-6]的科学家们对于河口海岸地区潮汐非线性的工作进行了大量研究: 研究发现在浅水域由于高水位和低水位潮波传播速度的差异性而导致了潮波波形的非对称性. 学者们还发现浅水分潮如 M_4 分潮, 周期呈 M_2 分潮数倍地出现, 且在河口狭长而且水深较浅的区域表现突出, 这种倍潮的出现是由于分潮之间存在交互作用, 是产生潮波非线性的重要因素. 对于中国大陆架上的潮波运动的非线性研究主要集中在长江口^[7]和珠江口^[8,9], 尽管已有大量的研究, 然而潮波运动的非线性仍是难以攻破的难题^[10], 且上述研

究主要着眼于河口地区受径流影响后潮波运动过程中体现的非线性, 多以理论分析和数据分析为主, 而缺少对大陆架上潮波运动特征的整体把控.

国外一些学者同时也研究了地形等因素对潮波运动的影响. Blanton等人^[11]在对南大西洋湾的天文潮模拟时, 发现河口的存在对横跨四大洲的南大西洋湾大陆架上的潮波运动影响很大. 学者们还发现潮波移动的速度经过大陆架中部后会发生明显的变化, 且潮波能量在跨越大陆架时有着明显的频带变化^[12-14]. 科学家们通过对全球海洋潮汐能量的分析发现, 天文潮的能量在浅边缘海域和通过宽阔的大陆架上时因底部摩擦有极大的损耗^[15-17]. 而海底的复杂地形, 对于潮波能量的整体态势也有深远的影响. 在美国, 科学家们发现从深海输入到大陆架上的部分能量被分流到诸如夏威夷岭和中大西洋脊之类的深海洋地区的斜压潮中^[18-21].

引用格式: 袁金金, 冯曦, 冯卫兵. 辐射沙洲地形对南黄海潮汐过程的影响. 科学通报, 2018, 63: 2904-2918

Yuan J J, Feng X, Feng W B. Effects of Radial Sand Ridges on tidal process in the South Yellow Sea (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 2904-2918, doi: 10.1360/N972018-00125

南黄海大陆架,浅水域面积宽广,辐射沙洲处于南黄海西部的旋转潮波系统与东海前进潮波系统的交汇处,潮差大,潮流强,形成了苏北浅滩特殊的水下地形,也使得南黄海的水动力条件变得更为复杂.早期针对中国海的研究横跨东海、黄海、渤海,而江苏沿海作为其中的局部区域,由于地形复杂,出海测量危险,未能得到较细致的潮汐潮流分布特征分析^[22,23].随着观测、模拟手段的提高,有关江苏沿海辐射沙洲海域的水动力研究在近20多年大量展开.其中,张东生等人^[24,25],诸裕良等人^[26]、宋志尧等人^[27]从潮流沙脊发育的动力条件出发,先后利用数值模拟手段,揭示了强往复潮流对辐射沙洲的塑造作用和次生横向环流对辐射沙洲演变发育的影响.之后学者们利用该地区的潮波模拟系统对辐射沙洲地区的余流场做了分析,以探寻污染物的扩散^[28-30].另一方面,由于辐射沙洲不断地演变,辐射沙洲局部的水沙运输、沉积机制和沙脊沙沟的稳定性也得到了充分关注^[31-38].陈可峰等人^[39]利用近40年来的水下地形资料对比显示,南黄海辐射沙洲区水道及其之间的沙洲普遍存在逐渐向南偏移的趋势,加之过去十余年来江苏沿海围垦工程、人工岛工程和港口持续的开发均会对潮流场产生影响^[40-43].同时,从上述研究发现,学者们的关注点多集中在南黄海辐射沙洲发育、演变的机制上,而对潮波在中大尺度范畴上的运动和动力特征关注较少.潮波在横跨黄海大陆架过程中,其运动特性、波形的演变同时也反映了其能量的重新分配.特别地,由于潮能的分流而导致的潮混合区的迁移将极大地影响水下的生态环境^[44,45].本文拟从中尺度大陆架上水深的基本构型出发,运用海岸及大洋环流模型FVCOM模拟,探讨在有无辐射沙洲地形情况下,潮波运动的变化、潮能的重新分配和潮混合区的分布情况,对潮汐、潮流的预测,渔业的发展和维持南黄海生态环境皆有着重要的意义.

1 数据和方法

1.1 模型简介

本文采用的是海岸及大洋环流模型FVCOM.该模型采用非结构三角形网格,可以对局部复杂地形进行加密;在垂向上采用 σ 坐标,能够很好地拟合复杂的海底地形;采用干湿判别法来处理潮汐动边界,

因而能较好地模拟涨落潮期间滩涂的露出及淹没^[46,47].FVCOM模型被广泛地应用于研究拥有不规则海岸线和复杂地形的河口和陆架区域中^[48-50].综上,该模型非常适用于江苏辐射沙洲这种地形复杂、潮沟潮脊交互贯穿、水深浅、潮滩纵深长的地区的潮汐模拟.

1.2 模型设置

本文的研究区域以辐射沙洲为中心,东西横跨 $119^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$,南北覆盖包括 $31^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$,囊括了中国黄海的大部分地区和渤海的部分南方地区.研究区域及网格图如图1所示,该区域在东、南、北3个边界上均设有海洋开边界,西边界则为陆地边界,初始水深地形如图2(a)所示.为了更好地拟合南黄海海域复杂的海岸线边界和海底地形,模型采用非结构三角形网格,分辨率由海向岸增大,最高空间分辨率为150 m,最低为14 km,共包含16959个网格节点和32974个三角单元.垂向上设置3个 σ 层,模型的时间步长为60 s.采用潮位控制驱动模型,计算时给定开边界上不同节点处的潮位值,节点处的潮位值通过日本潮汐预报软件NAOTIDE获得并插值代入模型进行计算(http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/index_En.html).该潮汐预报软件给出的潮位数据包括 M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , S_a 等共23个分潮.该潮汐软件经过同化T/P卫星高度计和东亚地区沿岸验潮站观测资料,其精度较采用纯T/P卫星高度计资料作为边界条件要更高,对比结果如表1.模型采用冷启动方式,假设开始时海洋是静止的,初始条件为在所有计算节点上的水位值和三角单元上的流速值都为0,因此预留了1个月的冷启动的加速时间,以避免由于冷启动和静止假设带来的误差,模型每隔1 h输出1个数据.

2 模型验证

本文尽可能地收集了多个验潮站的数据,这些测站由北向南覆盖了大部分南黄海的海岸线,测站的位置如图1(a)所示.其中石臼所和吕四港的实测资料来自夏威夷海平面中心(<https://uhslc.soest.hawaii.edu/>),而其余4个测站由河海大学建立,天文潮数据则利用调和工具t-tide从实测资料分析得出.本文分别利用石臼所和吕四港1995年的潮位资料,和来自河海大学各测站2014~2015年的数据进行模型的

图1 (网络版彩色)研究区域概况。(a) 研究区域网格及验潮站位置图; (b) 辐射沙洲区域地形图以及潮流通道内的分析站点

Figure 1 (Color online) Computational domain general situation. (a) Computational domain of the hydrodynamic model (the box in dashed line indicates the region of Radial Sand Ridges) and the locations of tide gauges used to validate the model; (b) bathymetry of the Radial Sand Ridges area and the stations for tidal-process analysis

表1 实测值与模拟值对比^{a)}

Table 1 Comparison of measured and simulated values									
测站	经度(°E)	纬度(°N)	类型	平均潮差(m)	潮差RMSE	潮位变差 C_v	平均相位差(h)	相位RMSE	观测时间(d)
石臼所	119.55	35.38	TOPEX7.2	2.05	0.21	0.07	0.42	0.20	365
			NAOTIDE	2.43	0.15	0.05	0.31	0.14	
			模拟值	3.02	0.04	0.01	0.20	0.07	
			实测值	3.13	—	—	—	—	
连云港	119.49	34.73	TOPEX7.2	2.50	0.25	0.07	0.45	0.29	792
			NAOTIDE	2.94	0.17	0.05	0.29	0.13	
			模拟值	3.54	0.06	0.02	0.16	0.04	
			实测值	3.69	—	—	—	—	
响水	120.09	34.44	TOPEX7.2	2.22	0.13	0.05	0.57	0.48	1177
			NAOTIDE	1.73	0.22	0.08	0.60	0.50	
			模拟值	2.70	0.05	0.02	0.21	0.14	
			实测值	2.69	—	—	—	—	
大丰	120.81	33.28	TOPEX7.2	2.12	0.29	0.09	0.65	0.50	847
			NAOTIDE	3.02	0.17	0.05	0.53	0.43	
			模拟值	2.63	0.16	0.05	0.24	0.09	
			实测值	3.27	—	—	—	—	
蛎蚜山	121.56	32.16	TOPEX7.2	3.09	0.26	0.07	0.56	0.35	1217
			NAOTIDE	3.30	0.15	0.04	0.40	0.19	
			模拟值	3.45	0.22	0.06	0.38	0.18	
			实测值	3.89	—	—	—	—	
吕四	121.62	32.13	TOPEX7.2	3.18	0.20	0.05	0.52	0.42	365
			NAOTIDE	3.30	0.15	0.04	0.41	0.20	
			模拟值	3.43	0.11	0.03	0.23	0.08	
			实测值	3.64	—	—	—	—	

a) 变差系数 C_v =潮差RMSE/平均潮差(实测值)

图2 (网络版彩色)研究区域地形。(a) 研究区域初始水深地形图;(b) 辐射沙洲区域真实地形;(c) 抹平辐射沙洲区域沙脊地形
Figure 2 (Color online) Computational domain terrain. (a) Bathymetry map of the computational domain; (b) bathymetry of the Radial Sand Ridges area; (c) Bathymetry of non-Radial Sand Ridges area

验证,并与卫星高度计提取的资料进行对比。从表1中可看出,总体而言,从NAOTIDE提取的值比从TOPEX7.2卫星高度计提取的值与实测值相比,均方根误差较小,故用NAOTIDE提供的潮位值作为开边界条件更准确。6个测站中,石臼所、连云港、响水和吕四模拟较好,变差系数都在0.05以下,而大丰和蛎蚜山两个测站的模拟值与实测值有一定的误差,其模拟潮差要比实测值偏低,潮差的变差系数都在0.05及以上。但总体而言,6个测站模拟值的潮差与实测潮差相对离散程度均较小,与NAOTIDE或TOPEX数据库相比均有不同程度的提高,且6个测站的相位均拟合很好。

本文对各分潮也进行了验证,表2选取了该海域 M_2 、 S_2 、 K_1 3个主要分潮的比较结果。大丰和蛎蚜山 M_2 分潮振幅模拟值比实测值分别偏小31.1%和23.0%, S_2 分潮振幅模拟值比实测值分别偏小31.0%和21.3%, K_1 分潮振幅模拟值比实测值分别偏小20.8%和23.8%,其余误差均较小。造成误差的主要原因有:模型中辐射沙洲地区近岸地形与实际地形存在偏差。其中,在大丰港和蛎蚜山所在的通州港近年来围垦、翻新、疏浚等一系列港口建设活动频繁,由于海岸工程建设速度快而导致地形资料未能及时匹配,因此造成数值模拟过程中出现误差。除却特殊的港口地形,从本文研究的尺度看,模型对于整个辐射沙洲地区潮波系统的模拟与实际情况吻合较好。

3 结果与讨论

为讨论辐射沙洲地形对潮波运动特性的影响,

在初始地形验证成功的基础上,本文又模拟了不考虑辐射沙洲地形时,中国南黄海海域的潮波运动。这部分水深资料来自美国地形数据库ETOPO1,在原本辐射沙洲所在的海域(图2(b)),沙脊沙沟被抹去,水深地形变化为图2(c)。其他条件和模型参数设置都和辐射沙洲地形条件下一样,使得两组实验具有对比性。对比发现,辐射沙洲地形对于潮波运动和潮波能量的分布、转化均有不同程度的影响。

3.1 辐射沙洲地形对潮波运动特性的影响

3.1.1 潮波波形

潮波进入辐射沙洲地形后,由于受到潮流水道的束流作用,使得潮波波形发生形变,涨潮历时变短,落潮历时变长。故选取潮波传播方向上4个站点和同一沙脊里(毛竹沙)4个站点定性分析潮汐不对称性,站点布置如图1(b)。图3为一个大潮期间各站点的水位时间序列,从图中可以看出,T1位于潮流水道最外侧,波形相对比较对称,涨落潮历时基本一致,T3位于潮流水道顶端,涨潮波形最陡,落潮波形最缓,说明涨潮历时变短而落潮历时变长,且潮差也变大。T5位于沙脊最外侧,T8位于沙脊最里侧,随着向沙脊推进,涨潮的波形也逐渐变陡,落潮波形逐渐变缓,潮差也增大,说明辐射沙洲地形对潮波变形产生很大的影响。

为定量分析这种影响,本文统计了这8个站点在一个大潮期间涨落潮平均潮差和涨落潮平均历时,如表3。从表中可以看出落潮平均历时均大于涨潮平均历时,在沿潮波传播方向上,位于潮流水道顶端的T3站点涨落潮历时差异最大,为1.29 h,而位于潮流

表 2 主要分潮振幅和相位对比

Table 2 Comparison of amplitude and phase of the main tidal constituents

测站	参数	实际结果	模拟结果	差值	误差百分比(%)
M_2					
石臼所	振幅(m)	1.48	1.45	0.03	2.03
	相位($^{\circ}$)	290.44	288.54	1.9	0.65
连云港	振幅(m)	1.70	1.63	0.07	4.12
	相位($^{\circ}$)	305.19	305.21	0.02	0.01
响水	振幅(m)	1.27	1.23	0.04	3.15
	相位($^{\circ}$)	327.05	324.77	2.28	0.70
大丰	振幅(m)	1.61	1.11	0.50	31.06
	相位($^{\circ}$)	89.21	98.92	9.71	10.88
蛎蚜山	振幅(m)	1.83	1.41	0.42	22.95
	相位($^{\circ}$)	117.13	132.01	14.88	12.70
吕四	振幅(m)	1.71	1.45	0.26	15.20
	相位($^{\circ}$)	120.28	128.35	8.07	6.71
S_2					
石臼所	振幅(m)	0.43	0.47	0.04	9.30
	相位($^{\circ}$)	326.49	315.99	10.5	3.22
连云港	振幅(m)	0.50	0.53	0.03	6.00
	相位($^{\circ}$)	344.72	334.46	10.26	2.98
响水	振幅(m)	0.35	0.37	0.02	5.71
	相位($^{\circ}$)	10.00	354.05	15.95	4.31
大丰	振幅(m)	0.58	0.40	0.18	31.03
	相位($^{\circ}$)	148.05	156.15	8.10	5.47
蛎蚜山	振幅(m)	0.80	0.63	0.17	21.25
	相位($^{\circ}$)	151.17	168.58	17.41	11.52
吕四	振幅(m)	0.74	0.64	0.10	13.51
	相位($^{\circ}$)	154.91	163.49	8.58	5.54
K_1					
石臼所	振幅(m)	0.28	0.27	0.01	3.57
	相位($^{\circ}$)	248.19	250.24	2.05	0.83
连云港	振幅(m)	0.31	0.28	0.03	9.68
	相位($^{\circ}$)	251.27	257.59	6.32	2.52
响水	振幅(m)	0.29	0.26	0.03	10.34
	相位($^{\circ}$)	258.20	265.17	6.97	2.70
大丰	振幅(m)	0.24	0.19	0.05	20.83
	相位($^{\circ}$)	298.26	308.92	10.66	3.57
蛎蚜山	振幅(m)	0.21	0.16	0.05	23.81
	相位($^{\circ}$)	26.47	26.71	0.24	0.91
吕四	振幅(m)	0.21	0.18	0.03	14.29
	相位($^{\circ}$)	28.09	26.08	2.01	7.16

水道最外侧的T4站点差异最小, 为0.35 h, 且随着潮波传播, 涨落潮潮差也增大. 位于同一沙脊里的4个站点也有同样的规律, 随着向沙脊推进, 涨落潮历时差异逐渐增大, 在顶端达到最大, 为1.65 h, 潮差也

随之增大. 该现象是因为潮波进入辐射沙洲后产生地形变浅效应, 浅水分潮与水深成反比^[1-3], 水深变浅从而使得浅水分潮比重逐渐增大, 潮波运动发生形变, 潮波非线性作用显著^[6], 落潮历时大于涨潮历时.

图3 (网络版彩色)潮流通道内8个站点水位时间序列。(a)4个站点沿潮波传播方向布置;(b)4个站点沿同一沙脊布置
Figure 3 (Color online) Water level time series in the Radial Sand Ridges at: (a) T1, T2, T3, T4, which are set along the tidal wave propagation direction; (b) T5, T6, T7, T8, which are set along the same tidal channel

表3 潮流通道内8个站点涨落潮平均潮差和平均历时

Table 3 Mean tidal range and mean duration of flood and ebb tide at 8 stations in the Radial Sand Ridges

站点	沙沟沙脊	水深(m)	涨潮平均历时(h)	落潮平均历时(h)	涨潮平均潮差(m)	落潮平均潮差(m)
T1	西洋	16.41	5.89	6.35	1.73	1.75
T2	东沙	2.51	5.89	6.35	2.51	2.53
T3	陈家坞槽	12.76	5.47	6.76	3.43	3.44
T4	烂沙洋	15.29	5.94	6.29	3.51	3.51
T5	毛竹沙	12.43	5.78	6.47	2.44	2.47
T6		3.74	5.59	6.65	3.36	3.37
T7		4.58	5.53	6.71	3.62	3.63
T8		3.38	5.29	6.94	3.82	3.82

3.1.2 潮流流速

图4和5对比,反映出辐射沙洲地形对南黄海潮流场的影响。图中截取了2014年9月10日11时~20时一个完整大潮周期的水位和流速。图4中,高平潮时,弶港水位最大,并向南北两侧及外海减小,辐射沙脊群外缘流速较大,整个海域的流速方向指向北。当弶港附近水位下降至平均海平面时,辐射沙脊海域处于落潮期,潮流场以弶港为中心呈辐射状指向外海及南北两侧。低平潮时,辐射沙脊群水位达到最低,北部废黄河口开始涨潮,此时北部废黄河的潮流以超过1 m/s的流速流向弶港附近。当弶港附近水位上

升至平均海平面时,辐射沙脊群处于涨潮期,南北部潮流向辐射沙脊群中心辐聚,流速由海向岸增大。由图中可以看出,辐射沙脊海域流速均超过1 m/s,涨潮期和落潮期流速均比北部废黄河口和南部长江河口大,且涨潮流速大于落潮流速。而图5中,整体上去除了辐射沙洲地形后该海域的流速都比图4中小,流速均不超过1 m/s,且涨、落潮流速都小于北部的废黄河口和南部长江口,这与图4中相反。辐射沙洲海域流速的整体偏大得益于该地区密布的多条潮流通道。在南翼的烂沙洋,北翼地区的西沙,这样的大潮流通道内潮流的流速较之平坦的、没有沟壑海底地形

图4 (网络版彩色) 含有沙脊群的地形条件下在一个平均大潮周期内(2014年9月10日期间)4个时刻潮位和垂向平均流速。(a) 高潮; (b) 落潮; (c) 低潮; (d) 涨潮

Figure 4 (Color online) Tidal level and mean vertical velocity at four times during a mean spring tidal cycle (equivalent to 2014-09-10) under the Radial Sand Ridges terrain. (a) High tide; (b) ebb tide; (c) low tide; (d) flood tide

的流速普遍增大。

3.2 辐射沙洲地形对潮波能量的影响

当潮波在崎岖的海底地形上传播时, 潮波能量会发生较大的变化。一方面, 潮能通过海底摩擦而耗散; 另一方面, 波折的地形激发了正压潮向内重力波的转换^[51]。上述潮能的转换过程使得底层的海水与表层的海水相互掺混, 该现象又称为潮混合。潮混合不仅代表了海洋层流至混流的转变, 也反映了潮能从正压状态转成内波状态的过程^[52,53]。潮混合常常在浅海中形成一种特殊的水文现象—潮汐锋。Qiao等人^[54]研究黄河口切变锋时也指出地形是影响切变锋位置的的决定性因素。Liu等人^[55]利用三维水动力模型探究了黄海北部的潮汐混合区空间分布特征, 然而

其研究区域并没有覆盖南黄海。下面依次分析辐射沙洲地形对潮能通量、潮能耗散和潮能转化的影响。

3.2.1 潮能通量

分别对 M_2 , S_2 , K_1 3个主要分潮的潮能通量进行了计算。根据Pugh^[56]提出的公式, 潮能分量在xy正交坐标系下的分量可以表达为

$$F_x = \frac{1}{2} \rho g h \eta u \cos(\varphi_\eta - \varphi_u), \quad F_y = \frac{1}{2} \rho g h \eta v \cos(\varphi_\eta - \varphi_v), \quad (1)$$

F_x 和 F_y 单位为W/m。式中, ρ 为海水密度, 取 $1.025 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, g 为重力加速度, h 为地点水深, η 代表瞬时潮位的振幅, u 、 v 代表瞬时速度, $\cos(\varphi_\eta - \varphi_{u,v})$ 代表水位振幅和速度之间的相位角。对比图如图6。

M_2 的潮能通量最大, S_2 约为其1/5, 而 K_1 要比 M_2 小1个量级。对比有无辐射沙洲地形可知, 辐射沙洲

图5 (网络版彩色)抹去沙脊群的地形条件下在一个平均大潮周期内(2014年9月10日期间)4个时刻潮位和垂向平均流速。(a) 高潮; (b) 落潮; (c) 低潮; (d) 涨潮

Figure 5 (Color online) Tidal level and mean vertical velocity at four times during a mean spring tidal cycle (equivalent to 2014-09-10) under the non-Radial Sand Ridges terrain. (a) High tide; (b) ebb tide; (c) low tide; (d) flood tide

地形的存在并不改变潮波整体的传播方向,但是对潮能通量的大小产生影响.图6中贴近辐射沙洲北翼的近岸地区和南翼地区潮能通量明显大于无辐射沙洲地形下的潮能通量.由上小节可知,辐射沙洲这一特殊地形使得该南黄海海域流速普遍增大,且潮差也增大,故该海域潮能通量较大.

3.2.2 潮能耗散

由于海底摩擦而引起的潮能耗散,可以根据Taylor^[57]提出的公式:

$$\mathcal{E} = \kappa \rho \langle [u(t)^2 + v(t)^2]^{\frac{3}{2}} \rangle, \quad (2)$$

进行计算,单位为W/m².式中, κ 为底摩擦系数, ρ 同上, $\langle \rangle$ 代表对一个潮周期进行时间平均, $u(t)$ 和 $v(t)$ 均

代表瞬时速度.对比图如图7(以 $\log_{10}\mathcal{E}$ 显示).

从图中可看出,对3个分潮而言, M_2 潮能耗散最大, S_2 和 K_1 要比其小1~2个量级.而在辐射沙洲地区,潮能通过底摩擦引起的耗散量比其他区域大.将有无辐射沙洲地形对比可发现,无辐射沙洲地形时,辐射沙洲区域潮能耗散明显减小,外海无明显变化.这很可能是由于沙脊和沙沟的交互作用,使得水流在潮流通道中发生反射,从而消耗了潮流的能量,加大了潮能耗散.

3.2.3 潮汐锋位置

Simpson和Hunter^[51]1974年在*Nature*上首先提出了潮混合层化参量,之后被各地学者们纷纷用来进行对于潮汐锋位置的判断:

图6 (网络版彩色)潮能通量对比图。(a)~(c) 含有沙脊群的地形;(d)~(f) 抹去沙脊群的地形

Figure 6 (Color online) Comparison of tidal energy flux in different bathymetries: (a)~(c) With the Radial Sand Ridges; (d)~(f) without Radial Sand Ridges

$$K = \log_{10} \left(\frac{H}{U^3} \right), \quad (3)$$

式中, H 为地点水深, U 为潮流的特征流速, 为与前人作比较^[53], 这里 U 取最大潮流流速, 来计算两种地形

下南黄海的潮混合层化参量 K 分布, 如图8.

赵保仁^[53]计算出黄海的临界层化参量值为1.8, 即当 $K > 1.8$ 时, 由于潮混合作用不强烈, 表、底层海水掺混不强烈, 使得表层和底层间密度差异较大, 海

图7 (网络版彩色)潮能耗散对比图. (a)~(c) 含有沙脊群的地形; (d)~(f) 抹去沙脊群的地形

Figure 7 (Color online) Comparison of tidal energy dissipation in different bathymetries: (a)~(c) With the Radial Sand Ridges; (d)~(f) without Radial Sand Ridges

水呈明显的层化状态, 故属于弱潮混合区; 当 $K < 1.8$ 时, 由于潮混合作用强烈, 表、底层海水掺混也强烈, 使得表层和底层间密度差异较小, 海水几乎无层化

可言, 属于强潮混合区. 由图8对比可看出, 在辐射沙洲地形条件下, 南黄海区域的层化参量值明显比无辐射沙洲时小, 甚至有很多近岸区域接近于0, 临

图8 (网络版彩色)层化参量 K 对比图. (a) 含有沙脊群的地形; (b) 抹去沙脊群的地形

Figure 8 (Color online) Comparison of stratification parameter K in different bathymetries: (a) With the Radial Sand Ridges; (b) without Radial Sand Ridges

界层化参量值1.8也更靠近近岸. 在辐射沙洲地形条件下, 外海的弱潮混合区范围也比无辐射沙洲地形时要小. 而由于辐射沙洲这一特殊地形的存在, 同时也影响到了北部废黄河口和南部长江河口的层化参量值, 使得这两个区域的层化参量值也变小.

以上说明辐射沙洲地形在改变潮波运动特征的同时, 也改变了潮能分布和潮能转化. 辐射沙洲使得潮混合作用增强. 不仅改变了南黄海区域强潮混合区和弱潮混合区的范围, 也改变了近岸区域的层化参量值, 使得近岸层化参量值更小, 海水上下掺混更严重.

4 结论

本文利用FVCOM三维水动力模式模拟了南黄海区域的潮波运动情况, 在此基础上, 又进一步模拟了在相同潮汐力作用下无辐射沙洲地形时的南黄海潮波运动的空间分布特征, 重点分析了两种地形对潮波在跨越南黄海大陆架过程中潮波形态、潮流流速、潮能通量、潮能耗散和潮混合区的变化, 从而分析辐射沙洲地形对天文潮在南黄海海域特别是近海海域整体态势的影响. 从对比实验中发现, 辐射沙洲地形对潮波运动和潮能(包括潮能通量、潮能耗散及潮汐锋位置)的影响在空间分布上较一致, 从山东半岛东

部海域(122°E左右范围内)跨越辐射沙洲一直到南部长江河口, 均有受到影响. 具体的结论如下:

(1) 潮波进入辐射沙洲地形后波形发生了严重的形变, 落潮历时大于涨潮历时, 且这种差异在潮流水道的顶端和沙脊的顶端最明显, 涨落潮潮差也随之增大. 该非线性现象由潮波进入辐射沙洲后在前进过程中与地形相互作用而产生, 且越接近近岸水深越浅, 这种差异也越大.

(2) 在辐射沙洲地形下, 辐射沙脊海域流速均超过1 m/s, 涨潮期和落潮期流速均比北部废黄河口和南部长江河口大. 无辐射沙洲时, 整体上该海域流速都变小, 辐射沙脊海域流速均不超过1 m/s, 且在涨潮期和落潮期, 辐射沙脊群流速都比北部废黄河口和南部长江河口小. 由此可见辐射沙洲这一地形的存在使得该海域流速变大.

(3) 辐射沙洲地形的存在并不改变该地区主要分潮的传播方向, 但是由于能加大了该海域的流速, 故潮能通量也随之变大; 由于沙脊和沙沟的交互作用, 使得水流在潮流通道中发生反射, 从而消耗了潮流的能量, 加大了潮能耗散, 使得辐射沙洲地区潮能耗散比其他区域大. 另一方面辐射沙洲的存在使得临界层化参量值向近海移动, 同时近岸区域的层化参量值变得更小, 海水掺混更严重.

致谢 感谢河海大学港口海岸与近海工程学院黄惠明老师在研究初期给予的帮助;感谢河海大学港口海岸与近海工程学院王义刚老师对本文的指正.

参考文献

- 1 Parker B B. Tidal Hydrodynamics. New York: John Wiley, 1991
- 2 Parker B B. The Relative Importance of the Various Nonlinear Mechanisms in a Wide Range of Tidal Interactions, in Tidal Hydrodynamics. New York: John Wiley, 1991. 237–268
- 3 Parker B B. Tidal Analysis and Prediction. NOAA Special Publication NOS CO-OPS 3, 2007
- 4 Aubrey D, Speer P. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems part I: Observations. *Estuar Coast Shelf Sci*, 1985, 21: 185–205
- 5 Friedrichs C, Aubrey D. Tidal propagation in strongly convergent channels. *J Geophys Res Oceans*, 1994, 99: 3321–3336
- 6 Pugh D T. Tides, Surges and Mean Sea Level—A Handbook for Scientists and Engineers. Chichester: John Wiley, 1987
- 7 Guo L C, Mick V W, Jay D A, et al. River-tide dynamics: Exploration of nonstationary and nonlinear tidal behavior in the Yangtze River estuary. *J Geophys Res Oceans*, 2015, 120: 3499–3521
- 8 Mao Q, Shi P, Yin K, et al. Tides and tidal currents in the Pearl River estuary. *Cont Shelf Res*, 2004, 24: 1797–1808
- 9 Zhang W, Cao Y, Zhu Y, et al. Flood frequency analysis for alterations of extreme maximum water levels in the Pearl River Delta. *Ocean Eng*, 2017, 129: 117–132
- 10 Hoitink A J F, Jay D A. Tidal river dynamics: Implications for deltas. *Rev Geophys*, 2016, 54: 240–272
- 11 Blanton B O, Werner F E, Seim H E, et al. Barotropic tides in the South Atlantic Bight. *J Geophys Res*, 2004, 109: C12024
- 12 Tebeau P A, Lee T N. Wind induced circulation on the Georgia shelf. Technical Report, University of Miami Florida. 1979
- 13 Lee T N, Brooks D. Initial observations of current, temperature, and coastal sea level response to atmospheric and Gulf Stream forcing. *Geophys Res Lett*, 1979, 6: 321–324
- 14 Pietrafesa L J, Blanton J O, Wang J D, et al. The tidal regime in the South Atlantic Bight. In: *Oceanography of the Southeastern US Continental Shelf*. Washington: American Geophysical Union, 1985. 63–76
- 15 Kang S K, Foreman M G G, Lie H J, et al. Two-layer tidal modeling of the Yellow and East China Seas with application to seasonal variability of the M2 tide. *J Geophys Res Oceans*, 2002, 107: 3020–3038
- 16 Davies A M, Kwong C N. Tidal energy fluxes and dissipation on the European continental shelf. *J Geophys Res Oceans*, 2000, 105: 21969–21989
- 17 Glorioso P, Flather R. The patagonian shelf tides. *Progr Oceanogr*, 1997, 40: 263–283
- 18 Kantha L H, Tierney C, Lopez J W, et al. Barotropic tides in the global ocean from a nonlinear tidal model assimilating altimetric tides: 2. Altimetric and geophysical implications. *J Geophys Res Oceans*, 1995, 100: 25309–25317
- 19 Ray R D, Mitchum G T. Surface manifestation of internal tides generated near Hawaii. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 2101–2104
- 20 Munk W. Once again: Once again-tidal friction. *Progr Oceanogr*, 1997, 40: 7–35
- 21 Egbert G D, Ray R. Significant dissipation of tidal energy in the deep ocean inferred from satellite altimeter data. *Nature*, 2000, 405: 775–778
- 22 Zhao B R, Fang G H, Cao D M. Numerical modeling of tide and tidal current in Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 1994, 16: 1–10 [赵保仁, 方国洪, 曹德明. 渤、黄、东海潮汐潮流的数值模拟. *海洋学报*, 1994, 16: 1–10]
- 23 Ye A L, Mei L M. Numerical modeling of tidal wave in Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea (in Chinese). *Oceanol Limnol Sin*, 1995, 26: 63–70 [叶安乐, 梅丽明. 渤黄东海潮波数值模拟. *海洋与湖沼*, 1995, 26: 63–70]
- 24 Zhang D S, Zhang J L. M2 tidal wave in the submarine radial sandbank of the Yellow Sea (in Chinese). *J Hohai Univ (Nat Sci)*, 1996, 24: 35–40 [张东生, 张君伦. 黄海海底辐射沙洲区的 M2 潮波. *河海大学学报(自然科学版)*, 1996, 24: 35–40]
- 25 Zhang D S, Zhang J L, Zhang C K, et al. Tidal current modeling-storm damage-current restoration—An experimental study on the dynamical mechanism of formation and evolution of submarine radiation sand ridges in the Yellow Sea (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 1998, 28: 394–402 [张东生, 张君伦, 张长宽, 等. 潮流塑造-风暴破坏-潮流恢复——试释黄海海底辐射沙脊群形成演变的动力机制. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1998, 28: 394–402]
- 26 Zhu Y L, Yan Y X, Xue H C, et al. Hydrodynamic mechanism of formation and development of radiation sandbanks in the South Yellow Sea-I. Trend movement plane characteristics (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 1998, 28: 403–410 [诸裕良, 严以新, 薛鸿超, 等. 南黄海辐射沙洲形成发育水动力机制研究—I. 潮流运动平面特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1998, 28: 403–410]

- 27 Song Z Y, Yan Y X. Hydrodynamic mechanism of formation and development of radiation sandbanks in the South Yellow Sea: II. Trendy sport façade features (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 1998, 28: 411–417 [宋志尧, 严以新. 南黄海辐射沙洲形成发育水动力机制研究: II. 潮流运动立面特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1998, 28: 411–417]
- 28 Tao J F, Zhang C K. Study on numerical modeling of water environment in sandy reaches of the Yellow Sea (in Chinese). *J Hohai Univ (Nat Sci)*, 2005, 33: 472–475 [陶建峰, 张长宽. 黄海辐射沙脊群海域水环境数值模拟研究. *河海大学学报(自然科学版)*, 2005, 33: 472–475]
- 29 Luo F, Li R J, Zhu Y X. Hydrological characteristics and COD tide diffusion calculation of radial sandbank in northern Jiangsu Province (in Chinese). *T Oceanol Limnol*, 2007, (S1): 25–32 [罗锋, 李瑞杰, 朱宇新. 苏北辐射沙洲海域水文特征与 COD 潮扩散计算分析. *海洋湖沼通报*, 2007, (S1): 25–32]
- 30 Liu J G, Li R J, Cao J J. Simulation of offshore hydrodynamic field and dilution and diffusion of sewage in northern Jiangsu Province (in Chinese). *J Mar Sci*, 2009, 27: 8–13 [刘金贵, 李瑞杰, 曹晶晶. 苏北近海水动力场及污水稀释扩散的模拟. *海洋学研究*, 2009, 27: 8–13]
- 31 Huang H M, Liu G P, Wang Y G, et al. Sediment processes and transport simulation of irradiation sandbanks in Jiangsu Province (in Chinese). *J Econ Water Res*, 2012, 30: 10–14 [黄惠明, 刘桂平, 王义刚, 等. 江苏沿海辐射沙脊群泥沙过程及输运模拟. *水利经济*, 2012, 30: 10–14]
- 32 Wu Y C, Huang H J, Yang Y L. The role of hydrodynamics in the formation and evolution of radiation sandbanks in the north of Jiangsu Province (in Chinese). *Stud Mar Sin*, 1998, (1): 55–63 [吴永成, 黄海军, 杨玉玲. 水动力在江苏北部岸外辐射沙洲形成和演变中的作用. *海洋科学集刊*, 1998, (1): 55–63]
- 33 Chen C, Wang Y G, Huang H M. Research progress of radiation sand ridges under the influence of tidal power (in Chinese). *Port Water Eng*, 2013, 482: 17–24 [陈橙, 王义刚, 黄惠明. 潮动力影响下辐射沙脊群的研究进展. *水运工程*, 2013, 482: 17–24]
- 34 Wang Y, Zhu D K, Zhou L F, et al. Sedimentary characteristics and evolution of radiation sand ridges in South Yellow Sea (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 1998, (5): 385–393 [王颖, 朱大奎, 周旅复, 等. 南黄海辐射沙脊群沉积特点及其演变. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1998, (5): 385–393]
- 35 Liu Y L, Wang Y P, Wu X B, et al. Analysis on mechanism of water and sediment transport in the western Subei Channel of north Jiangsu Province in the South Yellow Sea (in Chinese). *Mar Sci*, 2011, 35: 120–127 [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. *海洋科学*, 2011, 35: 120–127]
- 36 Chen J, Wang Y G, Zhang R S, et al. Study on stability of dongsha formation of sandy irradiation in Jiangsu Province (in Chinese). *Ocean Eng*, 2007, 25: 105–113 [陈君, 王义刚, 张忍顺, 等. 江苏岸外辐射沙脊群东沙稳定性研究. *海洋工程*, 2007, 25: 105–113]
- 37 Hou Q Z, Xu M, Lu P D. Radiation sandbanks south wing “waterway-sandbar” system and the stability of the western sun sand (in Chinese). *Mar Sci*, 2006, 30: 16–22 [侯庆志, 徐敏, 陆培东. 辐射沙洲南翼“水道-沙洲”系统与西太阳沙的稳定. *海洋科学*, 2006, 30: 16–22]
- 38 You K Y, Zhu D K, Wang X Y, et al. Study on the stability of Wanggang western tideway outside the North of Jiangsu Province (in Chinese). *Geogr Res*, 1998, 17: 10–16 [尤坤元, 朱大奎, 王雪瑜, 等. 苏北岸外辐射沙洲王港西洋潮流通道稳定性研究. *地理研究*, 1998, 17: 10–16]
- 39 Chen K F, Lu P D, Wang Y H, et al. Dynamic mechanism analysis of trend evolution of radiation sandbanks in South Yellow Sea (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2010, 21: 267–273 [陈可锋, 陆培东, 王艳红, 等. 南黄海辐射沙洲趋势性演变的动力机制分析. *水科学进展*, 2010, 21: 267–273]
- 40 Wu D A, Yan Y X, Tong C F. Calculation and analysis of tidal characteristics of Jiangsu Coastal Harbor (in Chinese). *J Hohai Univ (Nat Sci)*, 2007, 35: 471–476 [吴德安, 严以新, 童朝锋. 江苏海岸港口特征潮位计算与分析. *河海大学学报(自然科学版)*, 2007, 35: 471–476]
- 41 Chen K F, Lu P D, Wang Y H, et al. Influence of the Rudong construction island on the peripheral hydrodynamic and sediment scouring and silting (in Chinese). *China Harbor Eng*, 2008, (1): 8–12 [陈可锋, 陆培东, 王艳红, 等. 江苏如东人工岛建设对周边水动力及泥沙冲淤的影响. *中国港湾建设*, 2008, (1): 8–12]
- 42 Tao J F, Zhang C K, Yao J. Impact of large-scale reclamation on coastal tidal flow in Jiangsu Province (in Chinese). *J Hohai Univ (Nat Sci)*, 2011, 39: 225–230 [陶建峰, 张长宽, 姚静. 江苏沿海大规模围垦对近海潮汐潮流的影响. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39: 225–230]
- 43 Zhang C, Zheng J H, Liu G P, et al. Hydrodynamic characteristics of coastal area in Jiangsu Province and its response to reclamation project (in Chinese). *J Econ Water Res*, 2012, 30: 6–9 [张弛, 郑金海, 刘桂平, 等. 江苏近岸海域水动力特征及其对围垦工程的响应. *水利经济*, 2012, 30: 6–9]
- 44 Clara M L, Simionato C G, D’Onofrio E, et al. Future sea level rise and changes on tides in the Patagonian continental shelf. *J Coast Res*, 2015, 31: 519–535

- 45 Carless S J, Green J A M, Pelling H E, et al. Effects of future sea-level rise on tidal processes on the Patagonian Shelf. *J Marine Syst*, 2016, 163: 113–124
- 46 Chen C, Liu H, Beardsley R C. An unstructured grid, finite-volume, three dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries. *J Atmos Ocean Technol*, 2003, 20: 159–186
- 47 Chen C, Beardsley R C, Cowles G, et al. An Unstructured-Grid, Finite-Volume Community Ocean Model FVCOM User Manual. Third Ed. Technical Report, University of Massachusetts-Dartmouth. 2013
- 48 Zhu X M. Numerical simulation and study on tidal flow in China (in Chinese). Master Dissertation. Qingdao: Ocean University of China, 2009 [朱学明. 中国近海潮汐潮流的数值模拟与研究. 硕士学位论文. 青岛: 中国海洋大学, 2009]
- 49 Jing C S, Zhu X M, Bao X W, et al. Three-dimensional numerical simulation of Xiamen Bay and its surrounding waters based on FVCOM (in Chinese). *J Oceanogr Taiwan Strait*, 2011, 30: 103–113 [靖春生, 朱学明, 鲍献文, 等. 基于 FVCOM 的厦门湾及其周边海域三维潮流数值模拟. 台湾海峡, 2011, 30: 103–113]
- 50 Lü Z, Hu S. Study on characteristics of shallow water in north Jiangsu shallow beach (in Chinese). *Trans Oceanol Limnol*, 2017, (2): 31–38 [吕喆, 胡松. 苏北浅滩浅水分潮特征研究. 海洋湖沼通报, 2017, (2): 31–38]
- 51 Simpsom J H, Hunter J R. Fronts in the Irish Sea. *Nature*, 1974, 250: 404–406
- 52 Smith L, Stefan G, Young W R. Conversion of the barotropic tide. *J Phys Oceanogr*, 2002, 32: 1554–1566
- 53 Zhao B Z. Yellow Sea cold water front and tidal mixing (in Chinese). *Oceanol Limnol Sin*, 1985, 16: 451–460 [赵保仁. 黄海冷水团锋面与潮混合. 海洋与湖沼, 1985, 16: 451–460]
- 54 Qiao L L, Bao X W, Wu D X, et al. Numerical study of generation of the tidal shear front off the Yellow River mouth. *Cont Shelf Res*, 2008, 28: 1782–1790
- 55 Liu G M, Wang H, Sun S, et al. Numerical study on the velocity structure around tidal fronts in the Yellow Sea. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20: 453–460
- 56 Pugh D P. *Sea-level Science: Unstanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 56–57
- 57 Taylor G I. Tidal friction in the Irish Sea. *Phil Trans Roy Soc London*, 1919, 96: 330–330

Summary for “辐射沙洲地形对南黄海潮汐过程的影响”

Effects of Radial Sand Ridges on tidal process in the South Yellow Sea

Jinjin Yuan, Xi Feng* & Weibing Feng

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

* Corresponding author, E-mail: xifeng@hhu.edu.cn

The South Yellow Sea continental shelf, with a wide area of shallow waters, is located at the intersection of the rotating tidal wave system in the west of the South Yellow Sea and the tidal wave system in the East China Sea. The South Yellow Sea has a unique radiation sandbar terrain, and there are large currents of sand ridges and current channels. Most of the current researches focus on the development and evolution mechanisms of Radial Sand Ridges. However, there are few studies on the influence of tidal waves on terrain in this region. In this paper, the three-dimensional numerical model FVCOM (Finite Volume Coastal Ocean Model) was used to simulate the tidal propagation in the South Yellow Sea and was verified with measurements. This paper compares the changes in the tidal wave of the South Yellow Sea with and without the effect of Radial Sand Ridges to analyze the topographic effect. The changes of tidal wave shape, tidal current velocity, the redistribution of tidal energy and the distribution of tidal mixed zone were analyzed. This research has important implications for the prediction of tides, the development of fisheries and the maintenance of the ecological environment of the South Yellow Sea. The results show that the shape of tidal wave is distorted by the radial sand ridges: mainly, the duration of tidal ebbing is longer than that of tidal flooding. The distortion becomes distinct as the tidal wave approaches the shore, implying that the closer the tidal wave gets to the shore, the greater the nonlinear effect will be. The presence of the Radial Sand Ridges makes the flow rate of the radial inlet larger than 1 m/s, and the flow rate of both the rising tide and the ebbing tide is greater than that of the Waste Yellow River Estuary and the South Yangtze Estuary. At the same time, the existence of the special terrain enlarges the tidal energy flux, speeds up the tidal energy dissipation, and also makes the critical values of the tidal mixing front closer to the shore, namely the tidal mixing zone becoming shoreward. The Radial Sand Ridges also turns down the value of nearshore-stratification parameter. The sea-water blending is more severe in this area, compared to an idealized case with a flat shelf covering the South Yellow Sea. The range of influence of Radial Sand Ridges on tidal current velocity, tidal energy flux, tidal energy dissipation and tidal front position is relatively uniform. It has affected from the eastern part of the Shandong peninsula (around 122°E) across the Radial Sand Ridges to the southern Yangtze River estuary.

South Yellow Sea, Radial Sand Ridges, flood/ebb tide, tidal current velocity, tidal energy flux, tidal energy dissipation, tidal mixing

doi: 10.1360/N972018-00125