

江苏海岸中部近岸冬季潮汐和潮流特征

王逸涵¹, 王韞玮¹, 于谦², 蔡辉¹, 高抒³

(1. 河海大学 港口、海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210024; 2. 南京大学 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210023; 3. 华东师范大学 河口与海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 南黄海西侧的江苏海岸近岸区域, 素以地形复杂、潮流强劲、悬沙输运剧烈著称, 但是较长期的同步潮位和潮流观测数据仍然缺乏, 尤其是在近岸(<20 km)浅水(<20 m)区域。2014年1月在大丰港附近开展了连续潮位和潮流观测, 获得的数据揭示了一系列特征。此地潮汐潮流为正规半日潮, 浅水分潮显著。平均潮差为3.05 m, 最显著的两个分潮为 M_2 和 S_2 分潮, 振幅分别为1.45 m和0.52 m。潮流最显著的半日分潮 M_2 分潮和最显著的浅水分潮 M_4 分潮在沿岸方向上振幅分别为0.84 m/s和0.12 m/s, 在跨岸方向上振幅分别为0.24 m/s和0.01 m/s, 沿岸方向占绝对优势。潮波的沿岸传播介于前进波和驻波之间, 驻波的特征稍强。 M_2 分潮潮流椭圆最大流(长轴)方向为南偏东 7.4° 。存在冬季沿岸向北的余流, 垂向平均值的大小为2.2 cm/s。以上潮汐潮流特征为该区域海洋物质输运研究提供了基础资料。

关键词: 潮位; 潮流; 余流; 调和分析; 江苏海岸

中图分类号: P717 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2019)10-0066-09

DOI: 10.11759/hyxx20190110004

近海潮汐和潮流的研究历来为海洋学家们所重视^[1], 这不仅关系到海洋水体运动的刻画, 而且对于物质扩散特别是沉积物和溶解物的运动以及相关的海岸和海底沉积地貌演化和生物地球化学循环都有着密切关系。不仅物理海洋学家, 海洋地质、海洋化学和海洋生物工作者对此都十分关注。

南黄海西侧的江苏海岸近岸区域, 素以地形复杂、潮流强劲、悬沙输运剧烈著称, 潮汐作用是塑造江苏海岸和近海沉积地貌的主控因素, 该区域入海河流量均较小, 径流对于海流的影响可忽略不计^[2-3]。但是较长期的同步潮位和潮流观测数据仍然缺乏, 尤其是在近岸(<20 km)浅水(<20 m)区域。苏北沿岸流作为黄海环流的一个重要组成部分被广为提及, 并被认为是终年沿岸向南的^[4-7]。观测和模拟资料多在离岸较远、水深较大的区域^[8-11]。同样的, 近岸浅水区域的资料较少。然而, 近岸浅水区域在沉积物输运研究中具有重要的作用。悬沙浓度自岸线向海快速减小^[12-13], 对于整个海域沿岸方向上的悬沙通量来说, 近岸浅水区域的潮汐潮流(包括余流)显得异常关键。

本研究选取江苏海岸中部的大丰港附近海域开展连续潮位和潮流观测。在大丰港1期码头进行潮位观测, 在岸外7.6 km水深约14 m的西洋深槽中部的浮标上进行ADCP流速观测, 获得此地冬季代表性

潮汐潮流特征, 为海洋物质输运研究提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 观测

本文分析了河海大学大丰海洋观测站(图1)2014年1月潮汐、潮流的实测数据(资料来源于河海大学港口航道工程与海岸海洋科学实验中心), 包含潮位、不同水深处的流速北分量和东分量, 以代表此地冬季特征。潮位站位于大丰港一期码头, 使用VEGAplus61雷达式潮位计每小时测量潮位, 潮位基面为国家85高程。潮流由浮标上安装的下视ADCP(TRDI WHR-1 200 kHz)观测得到, 垂向分辨率1 m, 每小时获得一个流速剖面。水体表层盲区为1.9 m, 底层盲区约为水深的8%。获得的流速为离水面某一深度的流速北分量和东分量。潮位和流速数据连续1个月, 没有缺失。

收稿日期: 2019-01-10; 修回日期: 2019-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41676077, 41676081); 河海大学中央高校基本科研业务费专项资金(2016B00814)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41676077, 41676081; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2016B00814]

作者简介: 王逸涵(1996-), 男, 江苏无锡人, 硕士研究生, E-mail: 929332242@qq.com; 王韞玮, 通信作者, 副教授, 从事海洋沉积物力学研究, E-mail: ms.ywwang@gmail.com

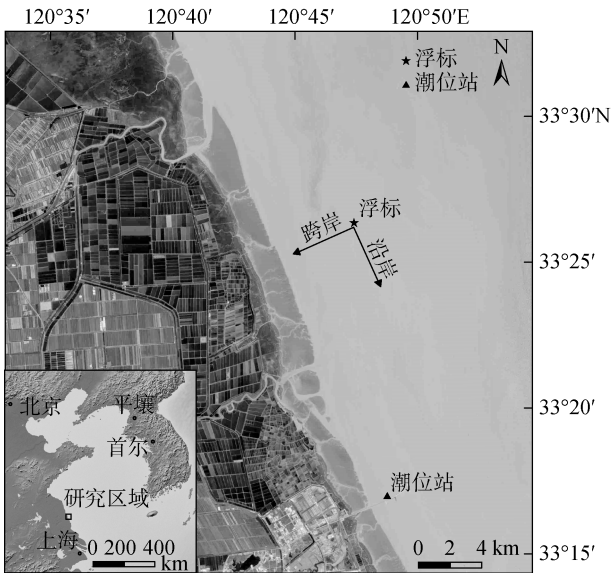


图1 观测站位图

Fig.1 Observation sites

注: 箭头指示沿岸和跨岸流速的正方向

1.2 数据分析

观测所得到流速数据为相对水面的绝对深度坐标下, 由于水深随时间变化, 使得比较分析困难。本文将流速数据转换至相对深度坐标系(σ 坐标)中, 得到 $0.1h \sim 0.9h$ 的对应水深流速, h 为水深, $0.1h$ 为距底水深 10%处(近底), $0.9h$ 为距底水深 90%处(近表面)。同时求出垂向平均流速。东向和北向流速分量投影为沿岸和跨岸方向的流速分量, 正方向分别为沿岸向南和跨岸向陆(如图 1), 即涨潮方向潮流在此两个方向上均为正值。沿岸正方向为从正北顺时针旋转 157° 。

对潮位和各层以及垂向平均的沿岸和跨岸流速的时间序列, 使用 World Tides 程序计算潮汐和潮流调和常数^[14]。World Tides 是一款基于用户图形界面的潮汐潮流分析与预报程序, 相比于传统的 T-Tide 程序操作更简单, 可视化程度高, 且其分析结果和 T-Tide 相比具有一致性, 说明程序可靠。对于一个月时长的观测资料, 选取合适的分潮, 并且以均方根误差(RMSE)小、总方差解释程度(R_{var})高以及分潮数尽可能少为原则逐步优化, 最终选取了 O_1 、 K_1 、 N_2 、 M_2 、 S_2 、 MN_4 、 M_4 、 MS_4 、 M_6 共 9 个分潮, 用得到的调和常数研究潮汐潮流特征。利用沿岸和跨岸流速的调和常数, 采用方国洪的方法^[15]计算各分潮的潮流椭圆参数, 包括长半轴 W 、短半轴 w (正值时为潮流逆时针旋转, 负值时为顺时针旋转)、最大流方向 θ 和最大流发生时间 τ 、椭圆率 $k=w/W$ 、潮流椭

圆的迟角 $x = \tau\sigma$ (σ 为分潮角频率)。

海上实测的水流, 包括周期性潮流和余流两部分, 故余流是从实际海流总矢量中去除潮流后剩下的部分, 其主要组成部分包括风海流、密度流和河流入海的径流等。对各层和以及垂向平均的沿岸和跨岸流速的调和与分析得到的非周期项即为余流, 而余流流速在垂向的分布则为余流流速剖面。

经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析方法能够把随时间变化的空间变量分解为不随时间变化的空间函数部分以及只依赖时间变化的时间函数部分。即将多个空间点的流速的时间序列进行正交分解, 得到按流速总方差解释程度从大到小的一系列模态。任意一个模态都包含空间分量和时间分量, 空间分量反映该模态大小的空间分布, 时间分量反映该空间分量随时间的变化^[8, 16-17]。

对随时间变化的垂向各层沿岸和跨岸流速进行 EOF 分析, 可以得到各模态空间分量 EOF_i 和时间分量 $PC_i (i=1, 2, \dots)$ 。其中第一模态空间分量 EOF_1 及其时间分量 PC_1 是占绝对主导地位的。 $EOF_1(k)$ 仅代表流速垂向分布的相对大小, 只有将时间分量的值标准化, 使其均方根为 1, 其对应的空间分量才能代表流速垂向分布的绝对大小, 即特征流速垂向分布。因此, 为求得特征流速垂向分布 EOF^* (对应的时间分量为 PC^*), 对 EOF_1 进行如下变换: $EOF^* \cdot \sqrt{\lambda_*} = EOF^* = EOF_1 \cdot \sqrt{\lambda_1}$, 其中 $\lambda_* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PC^*(k)^2$, $\lambda_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PC_1(k)^2$, $k=1, 2, \dots, n$, n 为时间分量的总个数。此时, 标准化后的时间分量值的均方根 $\sqrt{\lambda_*}$ 为 1, 对应的标准化后的空间分量为 EOF^* , 作为特征流速垂向分布。

2 结果

2.1 潮汐水位特征

2014 年 1 月的观测和调和与分析回报水位时间序列如图 2 所示, 水位调和常数见表 1。此地潮差大约在 2~5 m 之间。半日分潮的振幅占主导地位, M_2 和 S_2 分潮振幅达 1.45 m 和 0.52 m, 而全日分潮振幅要小得多, K_1 和 O_1 分潮振幅只有 0.26 m 和 0.17 m, 浅水分潮十分显著, 振幅和全日分潮达到同一量级, M_4 和 MS_4 分潮振幅达 0.18 m 和 0.13 m。平均海平面为 -0.172 m, RMSE 为 0.291 m, R_{var} 为 94.39%。

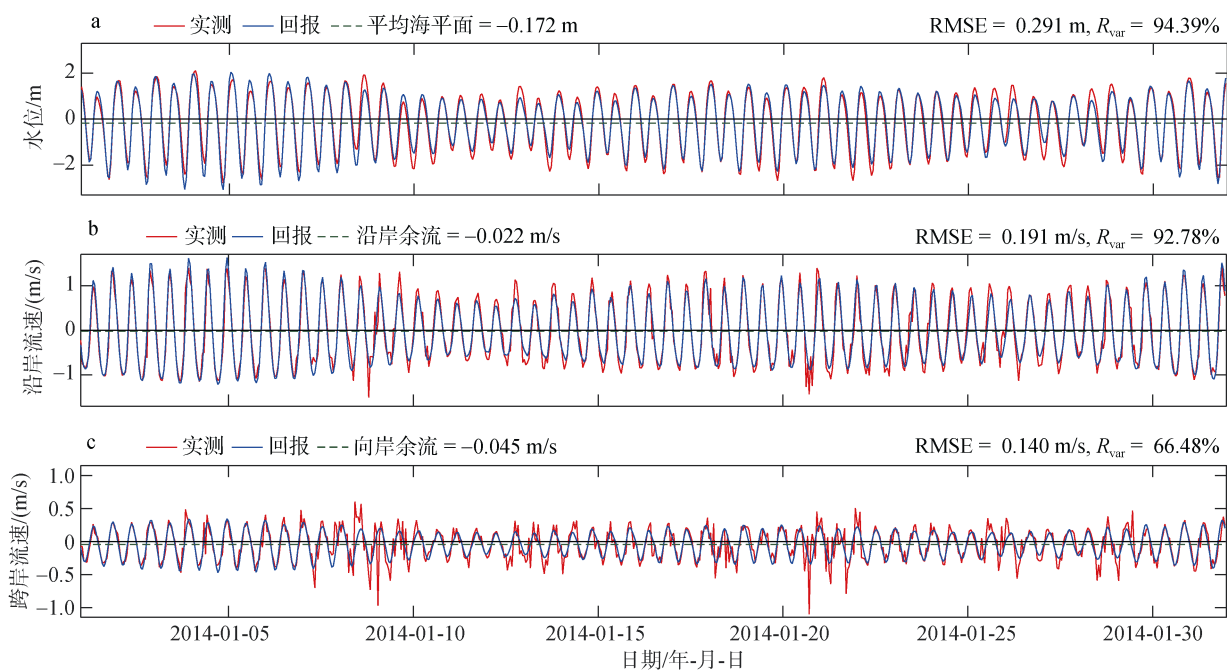


图 2 2014 年 1 月大丰附近海域水位(a)、沿岸(b)和跨岸(c)垂向平均流速时间序列

Fig.2 Time series of (a) water level, (b) alongshore and (c) cross-shore depth-averaged velocity near Dafeng in Jan 2014
注: RMSE: 调和分析的均方根误差; R_{var} : 总方差解释程度; 流速正方向: 涨潮方向, 即沿岸正方向为沿岸向南; 跨岸正方向: 向岸

表 1 水位、沿岸/跨岸垂向平均流速的调和常数(加粗字体显示振幅和迟角, 正负号的范围为 95%的置信区间)

Tab.1 Harmonic constants of water level, and alongshore/cross-shore depth-averaged velocities

分潮	振幅			迟角/ $^{\circ}$			信噪比		
	水位/m	沿岸垂向 平均流速/(m/s)	跨岸垂向 平均流速/(m/s)	水位	沿岸垂向 平均流速	跨岸垂向 平均流速	水位	沿岸垂向 平均流速	跨岸垂向 平均流速
O_1	0.174 ± 0.030	0.063 ± 0.016	0.01 ± 0.013	315.4 ± 9.3	251.8 ± 16.33	252 ± 54.14	33	16	0.97
K_1	0.255 ± 0.030	0.082 ± 0.018	0.026 ± 0.014	61.5 ± 6.3	357.1 ± 14.10	13.3 ± 25.21	71	21	3.9
N_2	0.288 ± 0.114	0.18 ± 0.066	0.051 ± 0.023	149.4 ± 25.9	85.9 ± 21.83	76.8 ± 31.64	6.5	7.4	4.7
M_2	1.45 ± 0.137	0.84 ± 0.059	0.235 ± 0.028	268.5 ± 4.8	197.9 ± 4.13	196.4 ± 6.13	110	200	71
S_2	0.522 ± 0.144	0.281 ± 0.067	0.082 ± 0.027	48.6 ± 13.5	327.2 ± 13.22	332.2 ± 19.60	13	18	8.5
MN_4	0.084 ± 0.017	0.025 ± 0.018	0.006 ± 0.013	282.6 ± 10.7	256.7 ± 48.84	73.1 ± 126.89	24	1.9	0.23
M_4	0.183 ± 0.018	0.118 ± 0.018	0.009 ± 0.013	36.9 ± 5.5	9.5 ± 8.61	259.4 ± 113.82	100	43	0.49
MS_4	0.132 ± 0.020	0.069 ± 0.021	0.022 ± 0.018	159.5 ± 8.1	125.4 ± 16.97	41.4 ± 50.41	43	11	1.5
M_6	0.037 ± 0.010	0.039 ± 0.017	0.01 ± 0.015	215.5 ± 17.9	147.9 ± 28.03	245.4 ± 134.17	11	4.2	0.43

潮汐类型按公式 $F = (H_{O_1} + H_{K_1}) / H_{M_2}$ 和 $G = H_{M_4} / H_{M_2}$ 进行判断, 其中 H 为分潮水位振幅。 $F \in (0, 0.5]$ 时为正规半日潮, $F \in (0.5, 2.0]$ 时为非正规半日潮, $F \in (2.0, 4.0]$ 时为非正规全日潮,

$F \in (4.0, +\infty)$ 时为正规全日潮。当的 $G > 0.04$ 为浅水分潮显著。计算得到 $F=0.296, G=0.126$, 故可知大丰所处海域潮汐类型为正规半日潮且浅水分潮显著。

采用公式 $2.02H_{M_2} + 0.58H_{S_2}^2 / H_{M_2} + 0.08(H_{K_1} + H_{O_1})^2 / H_{M_2}$ 和 $2(1.29H_{S_2} + 1.23H_{M_2} + H_{K_1} + H_{O_1})$ 计算平均潮差和最大可能潮差^[18], 利用表 1 的调和常数计算得到的平均潮差和最大可能潮差分别为 3.048 m 和 5.772 m。

潮高日不等类型由 $g_{M_2} - (g_{K_1} + g_{O_1})$ 判断, g 为分潮迟角, 其值为 0° 左右时, 则呈现高潮日不等; 为 180° 左右, 则呈现低潮日不等; 为 270° 左右, 则呈现高潮低潮均日不等现象^[18]。计算得 $g_{M_2} - (g_{K_1} + g_{O_1}) = 252^\circ$, 接近 270° , 所以呈现高潮和低潮均日不等。

涨落潮历时日不等现象, 即涨落潮非对称性, 是由浅水分潮和半日潮的相位差 ($2g_{M_2} - g_{M_4}$) 以及振幅比决定的。而涨落潮历时中哪一个历时更长, 由相位差判断。若此差值为 90° 左右 ($0 \sim 180^\circ$), 则落潮历时大于涨潮历时, 呈现涨潮优势; 若此差值为 270° 左右 ($180 \sim 360^\circ$), 则涨潮历时大于落潮历时, 呈现落潮优势^[19]。计算得相位差为 140.1° , 故落潮历时大于涨潮历时, 呈现涨潮优势。又由于此地 $H_{M_4} / H_{M_2} = 0.126$, 浅水分潮显著, 所以涨潮优势也十分显著。

2.2 潮流特征

潮流特征的分析由整体特征和垂向结构两个部分组成。整体特征使用 σ 坐标下的垂向平均流速的描述。潮流站位的平均水深为 14.08 m。2014 年 1 月的沿岸和跨岸方向的垂向平均潮流流速时间序列(实测和回报值)如图 2 所示。沿岸流速在 $-1.5 \sim 1.5$ m/s 范围内变化, 跨岸流速除个别峰值外主要在 $-0.5 \sim 0.5$ m/s 范围内变化。可以看出, 沿岸流速明显比跨岸流速大的多, 占绝对主导地位, 且以天文潮的贡献为主 (RMSE=0.191 m/s, $R_{var}=92.78\%$); 跨岸方向非主流向, 且调和分析结果显示非天文潮因素对跨岸流速的贡献较大, 但调和分析仍能反映出天文潮作用的部分 (RMSE=0.140 m/s, $R_{var}=66.48\%$); 沿岸流速和跨岸流速的相位相近, 二者基本上同正同负。

沿岸和跨岸垂向平均流速的调和常数如表 1 所示。其中最显著半日分潮是 M_2 分潮, 沿岸和跨岸分量的振幅达 0.840 m/s 和 0.235 m/s。最显著全日分潮

是 K_1 分潮, 沿岸和跨岸分量的振幅为 0.082 m/s 和 0.026 m/s。其最显著的四分之一日周期的浅水分潮是 M_4 分潮, 沿岸和跨岸分量的振幅达 0.118 m/s 和 0.009 m/s。半日分潮流占主导地位, 浅水分潮也十分显著。沿岸和跨岸方向的 M_2 分潮的相位非常接近, 分别为 197.9° 和 196.4° , 其他天文分潮 O_1 、 K_1 、 N_2 、 S_2 沿岸和跨岸分量的相位也十分接近, 显示了潮流的往复流特征。但是各浅水分潮 (MN_4 、 M_4 、 MS_4 、 M_6) 沿岸和跨岸分量的相位迥异。

潮流垂向结构特征包括余流流速剖面、特征流速剖面和潮流调和常数的垂向分布。通过除去海流中周期性潮流得到的余流部分, 其流速剖面可见图 3。跨岸余流在近底层 ($0.1h$) 处为 -0.016 m/s, 向上流速的逐层增大且近似线性变化, 在近表层 ($0.9h$) 处为 -0.062 m/s, 其垂向平均余流流速为 -0.045 m/s。各层和垂向平均的跨岸余流均指向向海方向。沿岸余流在近底层 ($0.1h$) 处为 0.005 m/s, 方向为沿岸向南, $0.2h$ 处转为沿岸向北, 大小为 0.014 m/s, 之后流速的逐层增大, 在近表层 ($0.9h$) 处为 -0.052 m/s, 其垂向平均余流流速为 -0.022 m/s, 方向为沿岸向北。

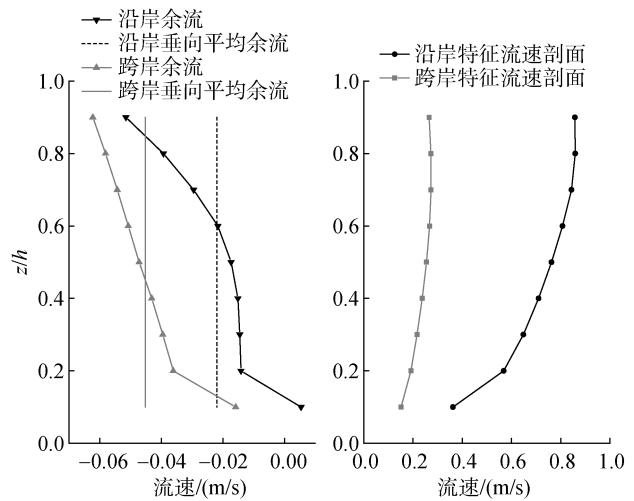


图 3 沿岸和跨岸方向余流和特征流速垂向剖面

Fig.3 Profiles of residual currents and characteristic velocity alongshore and cross-shore

注: z : 距底高度; h : 水深; z/h : 相对高度

对跨岸和沿岸流速分别作 EOF 分析, 计算结果显示第一模态方差贡献率, 跨岸为 91.87%, 沿岸为 98.80%。二者第一模态均占绝对主导地位, 所以可用第一模态代表流速剖面变化的绝大部分信息。也就是说, 此处流速剖面垂向特征(不同层位流速大小比例)十分稳定, 偏移特征流速剖面之外的流速比例很

小,尤其在沿岸方向上,几乎可以忽略。

第一模态的空间分量指示的特征流速剖面如图3。跨岸特征流速剖面近底层(0.1h)处为0.152 m/s,之后逐层增加,近表层(0.9h)处为0.266 m/s;沿岸特征流速剖面位于近底层(0.1h)处约0.362 m/s,之后逐层增加,其中0.1h~0.2h的增幅尤为明显,近表层(0.9h)处为0.857 m/s。可以看出,沿岸流速大约是跨岸流速大小的3倍,并且比值向上增加。

潮流调和常数的垂向分布特征包括潮流类型,分潮流速振幅和迟角,分潮流速椭圆长半轴(最大流速)的大小、方向及迟角,分潮流速椭圆率。

潮流类型按式 $F = (W_{O_1} + W_{K_1}) / W_{M_2}$ 和 $G = (W_{M_4} + W_{MS_4}) / W_{M_2}$ 进行判断,其中 W 为分潮流速椭圆长半轴大小。当 $F \in (0, 0.5]$ 时为正规半日潮; $F \in (0.5, 2.0]$ 时为非正规半日潮; $F \in (2.0, 4.0]$ 时为非正规全日潮; $F \in (4.0, +\infty)$ 时为正规全日潮,当 $G > 0.04$ 认为浅水分潮显著。利用各层流速调和常数计算得到图4,发现该测站各层 F 值向上减小,同时均小于0.5,因此判断为正规半日潮流;浅水分潮强度 G 值均大于0.04,且近底层(0.1h)潮流 G 值达到了0.25,浅水分潮非常显著。

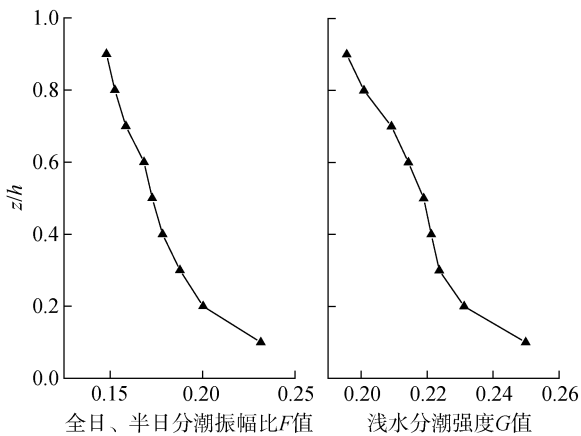


图4 各层深 F 、 G 值

Fig.4 F and G values at different depths

注: z : 距底高度; h : 水深; z/h : 相对高度; F : 潮型参数; G : 浅水分潮强度

由于 M_2 半日分潮主导且 M_4 浅水分潮显著,故考虑 M_2 和 M_4 潮流流速振幅和椭圆要素垂向的变化。图5显示了 M_2 和 M_4 分潮的沿岸和跨岸方向的流速振幅和潮流椭圆长轴。各深度上 M_2 分潮沿岸流速大于跨岸流速,潮流椭圆长半轴(最大流速)比沿岸流速略大一些,三者流速都随深度增加而减小,其中

跨岸流速振幅介于0.1~0.3 m/s,沿岸流速振幅和潮流椭圆长半轴介于0.4~1.1 m/s。各深度 M_4 分潮沿岸流速和潮流椭圆长半轴几乎一致,二者自底向上增加,至0.7h附近时达到最大值,之后略有减小,流速振幅约为0.06~0.14 m/s。跨岸流速自底向上,其值介于0~0.03 m/s。对比图5的两张子图,可以发现,相对于 M_2 分潮, M_4 分潮流速振幅在沿岸和跨岸方向上的差距更大。

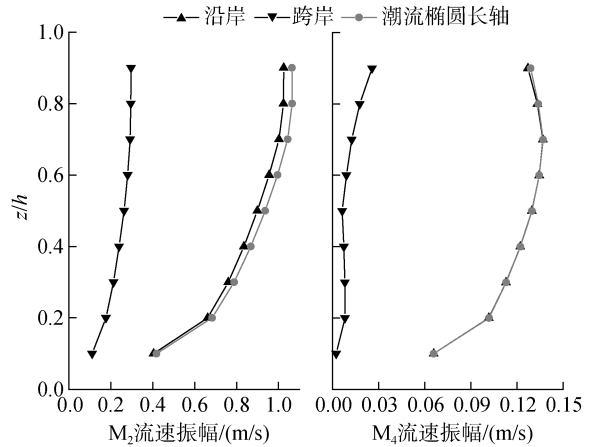


图5 M_2 和 M_4 分潮的沿岸和跨岸方向流速振幅和潮流椭圆长半轴垂向剖面

Fig.5 Profiles of alongshore and cross-shore velocity amplitudes and semi-major axes for M_2 and M_4 constituents

注: z : 距底高度; h : 水深; z/h : 相对高度

分潮潮流流速迟角垂向剖面可见图6。 M_2 分潮跨岸流流速迟角在近底层(0.1h)处为178.7°,0.2h~0.9h逐渐增加且呈近似线性,近表层(0.9h)处达到216.4°。沿岸流和最大流方向的迟角相差不大,大小均在194.5°~202.2°变化,在0.6h以上沿岸流速迟角略小于最大流方向的迟角,0.6h以下反之。位于0.6h附近时三者流速迟角近乎相等。 M_4 分潮跨岸流速在近底层(0.1h)迟角为125.2°,0.2h急剧减小到-51.5°,至近表层(0.9h)减小到-130.1°。沿岸流与最大流流速迟角近似相等,值介于6.2°~20.2°,垂向变化很小。

M_2 分潮潮流椭圆率在近底层(0.1h)处为-0.070,0.2h时减小至-0.077,而从0.2h~0.9h呈近似线性逐渐增大,跨越0值,至近表层(0.9h)处达到0.066。说明水层下部 M_2 潮流顺时针旋转,上部则为逆时针旋转,但是潮流椭圆短半轴相比长半轴都小一个数量级以上。 M_4 分潮潮流在近底层(0.1h)处椭圆率为0.036,0.2h向上变化不大,其值介于-0.113~-0.069,说明 M_4 潮流主要呈顺时针旋转,椭圆率相对 M_2 潮

流略大(图 7)。最大流与沿岸正方向的顺时针夹角上, M_2 分潮基本保持在 15° 左右, 垂向平均值为 15.6° 。 M_4 分潮位于 $0.1h$ 处为 -0.5° , $0.2h$ 处为 2.3° , $0.2h \sim 0.9h$ 不断减小, 从 $0.6h$ 处开始小于 0 , 至近表层($0.9h$)减小到 -9.6° , 垂向平均值为 -1.5° 。

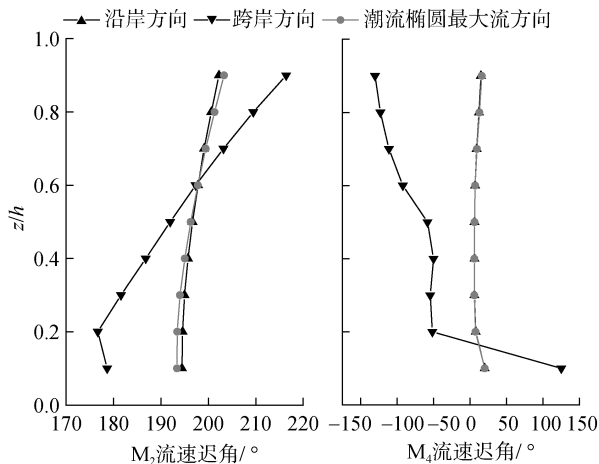


图 6 M_2 和 M_4 分潮流速沿岸、跨岸和潮流椭圆最大流方向的迟角的垂向剖面

Fig.6 Phase lag profiles of alongshore/cross-shore velocity and the maximum current orientation for M_2 and M_4 constituents

注: z : 距底高度; h : 水深; z/h : 相对高度

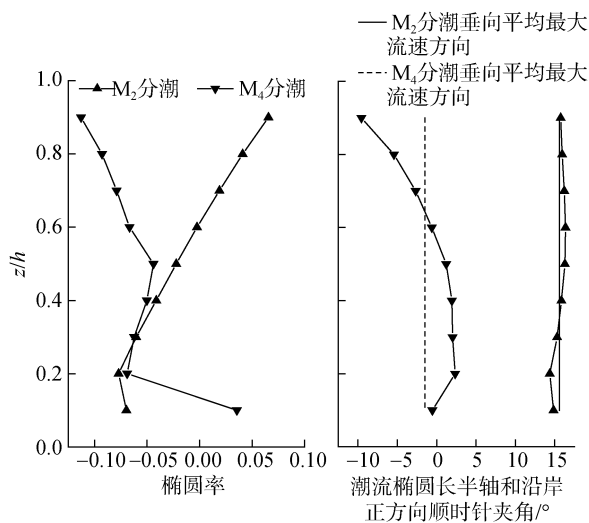


图 7 M_2 和 M_4 分潮流椭圆的椭圆率和最大流速(长半轴)方向的垂向剖面

Fig.7 Profiles of eccentricity and inclination of major axes for M_2 and M_4 tidal ellipses

注: z : 距底高度; h : 水深; z/h : 相对高度

3 讨论

3.1 流速和潮位的相位关系

潮流流速和潮位的相位差指示了潮波传播的特

征, 当相位差为 90° 时为驻波, 为 0° 时为前进波。潮位站和流速站(浮标)在沿岸方向上距离约 16 km (图 1), 10 m 水深时 M_2 分潮潮波的波长约为 450 km , 则流速站的 M_2 分潮潮位相位要比潮位站小约 13° , 约为 255.5° 。这样沿岸/跨岸垂向平均流速的 M_2 分潮相位领先水位 M_2 分潮相位约 57.6° , 介于前进波和驻波之间, 驻波的特征稍强。流速站位于西洋深槽的入口处, 西洋深槽向南延伸约 70 km , 终止于弥港附近的条形泥浅滩, 深槽中泓线水深约 $15 \sim 25 \text{ m}$ ^[20], 底床的摩擦和顶端的潮波反射共同导致了潮波向南传播的驻波特征。

3.2 江苏海岸中部的近岸冬季余流

苏北近岸的环流长期以来被认为是终年沿岸向南的^[4-7], 但是近年来一系列研究指出夏季受夏季优势南风影响是沿岸向北^[8-10, 21]。已有的观测和模拟资料多在离岸 30 km 以外水深 20 m 以深的区域^[8-11], 以上的近岸也是指这一区域。

江苏海岸中部, 即南黄海南部西侧, 在更加浅水近岸区域的长时间海流观测资料的报道较少。本研究的观测站位靠近海岸, 离岸线(海岸盐沼边缘)只有 7.6 km 。本研究发现, 对于垂向平均流速, 2014 年 1 月在此观测站位存在沿岸向北的余流, 整月的平均值大小为 2.2 cm/s (图 3)。将这段时间的沿岸垂向平均流速做 25 h 窗口(约为两个潮周期)的低通滤波, 得到流速的低频变化, 从而去除潮周期变化, 得到余流的时间变化(图 8)。可以发现, 沿岸余流并不是稳定的负值(沿岸向北), 而是存在正负倒转变化, 但是负值要多于正值, 所以月平均的余流是沿岸向北 2.2 cm/s 。余流的时间变化和气象因素关系密切^[8], 值得进一步研究。

沿岸余流的垂向分布也很有特点。近底层($0.1h$)处存在微弱沿岸向南的余流, 此上都是沿岸向北, 并且在水层上部沿岸向北的余流增大很快。除去垂向上的平均余流, 则存在下南上北的垂向余环流趋势。这一余流特征的存在对于冬季海洋的水、溶解物和悬浮泥沙输运都具有重要意义。

对于跨岸方向上的余流, 2014 年 1 月的观测显示了较强的向海流速(4.5 cm/s)。这一向海余流可能和辐射沙脊群的复杂地形导致的平面环流有关。并且跨岸余流的垂向分布也显示了向上增强的趋势, 但是各层的跨岸余流方向都是相同的。

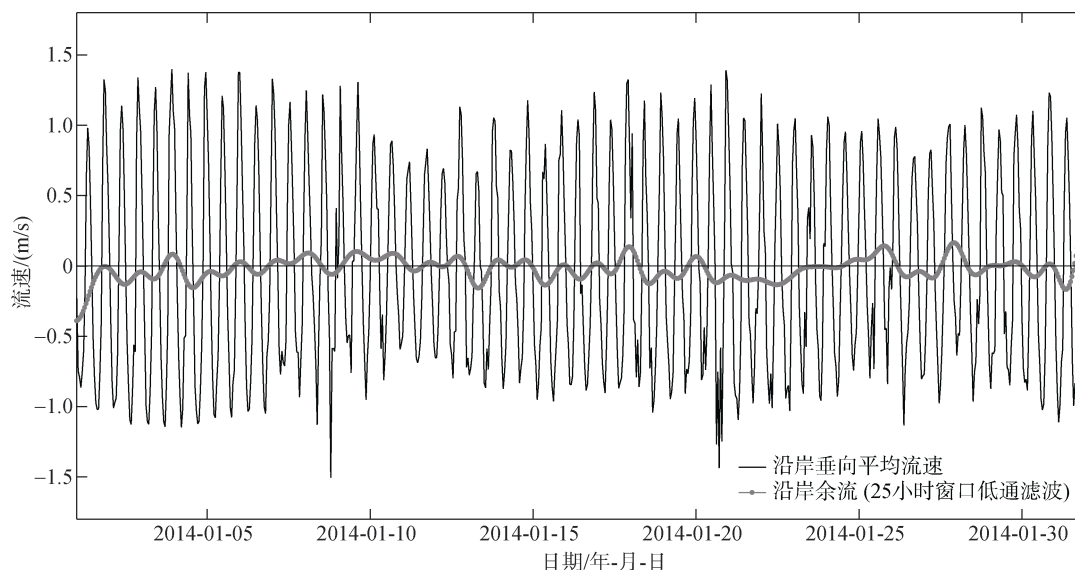


图 8 沿岸垂向平均流速和沿岸余流时间序列

Fig.8 Time series of depth-averaged velocity and residual currents alongshore

注: 沿岸流速正方向: 沿岸向南, 即涨潮方向

4 结论

2014年1月在江苏海岸中部近岸大丰港附近的潮位和潮流观测数据表明, 此地潮汐潮流为正规半日潮, 浅水分潮显著。平均潮差为 3.05 m, 最显著的两个分潮为 M_2 和 S_2 分潮, 振幅分别为 1.45 m 和 0.52 m。潮流最显著的半日分潮 M_2 分潮和最显著的浅水分潮 M_4 分潮在沿岸方向上振幅分别为 0.84 m/s 和 0.12 m/s, 在跨岸方向上振幅分别为 0.24 m/s 和 0.01 m/s, 沿岸方向占绝对优势。潮波的沿岸传播介于前进波和驻波之间, 驻波的特征稍强。 M_2 分潮潮流椭圆最大流(长轴)方向为沿岸正方向(从正北顺时针旋转 157°)再顺时针旋转 15.6° , 即南偏东 7.4° 。存在冬季沿岸向北的余流, 垂向平均值的大小为 2.2 cm/s。以上潮汐潮流特征为该区域海洋物质输运研究提供了基础资料。

参考文献:

- [1] Bowden K F. Physical oceanography of coastal waters[M]. John Wiley & Sons, 1983: 302.
- [2] 任美镠(主编). 江苏省海岸带与海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1986: 517.
Ren Mei-e. Report on a Comprehensive Survey of Coastal and Tidal Flat Resources Along Jiangsu Coastal Zone[M]. Beijing: China Ocean Press, 1986: 517.
- [3] 丁贤荣, 康彦彦, 茅志兵, 等. 南黄海辐射沙脊群特大潮差分析[J]. 海洋学报, 2014, 36(11): 12-20.
Ding Xianrong, Kang Yanyan, Mao Zhibin, et al. Analysis of largest tidal range in radial sand ridges southern Yellow Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(11): 12-20.
- [4] 赵保仁, Limeberner R, 胡敦欣, 等. 黄海南部及东海北部夏季若干水文特征[J]. 海洋与湖沼, 1991, 22(2): 132-139.
Zhao Baoren, Limeberner R, Hu Dunxin, et al. Oceanographic characteristics of the southern Yellow Sea and the northern East China Sea in summer[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1991, 22(2): 132-139.
- [5] Guan B. Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai and East China Seas[C]// Zhou D, Liang Y, Zeng C. Oceanology of China Seas. Dordrecht: Springer, 1994: 17-26.
- [6] Hu D. Some striking features of circulation in Huanghai sea and East China sea[C]// Zhou D, Liang Y, Zeng C. Oceanology of China Seas. Dordrecht: Springer, 1994: 27-38.
- [7] Su J L. Circulation dynamics of the China Seas: north of 18°N [C]// Robinson A R, Brink, K. The Sea, The Global Coastal Ocean: Regional Studies and Syntheses 11. John Wiley, 1998: 483-506.
- [8] 刘志亮, 胡敦欣. 黄海夏季近岸海区环流的初步分析及其与风速的关系[J]. 海洋学报, 2009, 31(2): 1-7.
Liu Zhiliang, Hu Dunxin. Preliminary study on Huanghai Sea coastal current and its relationship with local wind in summer[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(2): 1-7.
- [9] Yuan D, Zhu J, Li C, et al. Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satel-

- lite observations[J]. *Journal of Marine System*, 2008, 70: 134-149.
- [10] Yuan D, Li Y, Wang B, et al. Coastal circulation in the southwestern Yellow Sea in the summers of 2008 and 2009[J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 143: 101-117.
- [11] Tak Y J, Cho Y K, Seo G H, et al. Evolution of wind-driven flows in the Yellow Sea during winter[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121: 1970-1983.
- [12] 邢飞, 汪亚平, 高建华, 等. 江苏近岸海域悬沙浓度的时空分布特征[J]. *海洋与湖沼*, 2010, 41(3): 459-468.
Xing Fei, Wang Yaping, Gao Jianhua, et al. Seasonal distributions of the concentrations of suspended sediment along Jiangsu Coastal sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2010, 41(3): 459-468.
- [13] 于谦, 王韞玮, 高抒. 潮汐与陆架环流作用下的悬沙输运: 江苏新洋港海岸冬季观测结果[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2014, 50(5): 626-635.
Yu Qian, Wang Yunwei, Gao Shu. Tide and continental shelf circulation induced suspended sediment transport on the Jiangsu Coast: winter observations out of Xinyanggang[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2014, 50(5): 626-635.
- [14] Boon J D. *Secrets of the tide: tide and tidal current analysis and applications, storm surges and sea level trends*[M]. Chichester, UK: Horwood Publishing, 2004, 224.
- [15] 方国洪. 潮流垂直结构的基本特征—理论和观测的比较[J]. *海洋科学*, 1984, 8(3): 1-11.
Fang Guohong. Basic characteristics of vertical structure of tidal current-comparison between theory and observation [J]. *Marine Sciences*, 1984, 8(3): 1-11.
- [16] Gao S, Collins M B. Equilibrium coastal profiles: II. Evidence from EOF Analysis[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1998, 16: 193-205.
- [17] 庄园, 刘子洲, 翟方国. 北黄海定点连续观测站海流资料分析[J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48(4): 704-711.
Zhuang Yuan, Liu Zizhou, Zhai Fangguo. Analysis on continuous current observation in the noethern Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(4): 704-711.
- [18] 曾定勇, 倪晓波, 黄大吉. 南麂岛附近海域潮汐和潮流的特征[J]. *海洋学报*, 2012, 34(3): 1-10.
Zeng Dingyong, Ni Xiaobo, Huang Daji. Harmonic analysis of tide and tidal current near Nanji Island, Zhejiang Province[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(3): 1-10.
- [19] Friedrichs C T, Aubrey D G. Non-linear tidal distortion in shallow well mixed estuaries: A synthesis[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1988, 27: 521-545.
- [20] 张忍顺, 陈才俊. 江苏岸外沙洲演变与条子泥并陆前景研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 124.
Zhang Renshun, Chen Caijun. Evolution of sandbanks off the coast of Jiangsu and the prospect of merging sliver mud into land[M]. Beijing: China Ocean Press, 1992: 124.
- [21] 韦钦胜, 于志刚, 冉祥滨, 等. 黄海西部沿岸流系特征分析及其对物质输运的影响[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(2): 145-156.
Wei Qinsheng, Yu Zhigang, Ran Xiangbin, et al. Characteristics of the western coastal current of the Yellow Sea and its impacts on material transportation[J]. *Advances In Earth Science*, 2011, 26(2): 145-156.

Characteristics of tides and tidal currents at central Jiangsu coast, China

WANG Yi-han¹, WANG Yun-wei¹, YU Qian², CAI Hui¹, GAO Shu³

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. MOE Key Laboratory for Coast and Island Development, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. State Key Laboratory for Estuarine and Coastal Studies, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Received: Jan. 10, 2019

Key words: tidal level; tidal currents; residual currents; harmonic analysis; Jiangsu coast

Abstract: The near-shore area of the Jiangsu coast on the west side of the south Yellow Sea is known for its complex topography, strong currents, and intensive transport of suspended sediment. However, synchronized observational data of tide level and tidal currents for long periods are still lacking, particularly within 20 km offshore area, at a water depth of 20 m. In January 2014, continuous observations of tidal level and tidal currents were conducted near the Dafeng Port, located at the central Jiangsu coast. The observed data revealed a series of features. Tides and tidal currents in this area are regular semidiurnal, and shallow water over-tides are significant. The mean tidal range is 3.05 m, and the most significant tidal constituents are M_2 and S_2 , with amplitudes of 1.45 and 0.52 m, respectively. The most significant semidiurnal component and shallow water over-tide of tidal currents are M_2 and M_4 , respectively with amplitudes of 0.84 and 0.12 m/s alongshore, and 0.24 and 0.01 m/s cross-shore, showing an absolute dominance of the alongshore tidal currents. The alongshore propagation pattern of tidal waves is between progressive and standing waves with characteristics of standing waves being slightly strong. The maximum current of the M_2 tidal current ellipse is 7.4° south-east. Residual currents exist northward alongshore in winter, and the depth-averaged value is 2.2 cm/s. These characteristics provided the basis for research on marine material transport in this area.

(本文编辑: 李晓燕)