

冯曦, 丁志伟, 冯辉, 等. 南黄海辐射沙洲潮流不对称性对岸线变动的响应[J]. 海洋学报, 2022, 44(6): 1–9, doi:10.12284/hyxb2022049
Feng Xi, Ding Zhiwei, Feng Hui, et al. Responses of tidal-current-asymmetry to shoreline variation in radial sand ridges in the South Yellow Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(6): 1–9, doi:10.12284/hyxb2022049

南黄海辐射沙洲潮流不对称性对岸线变动的响应

冯曦¹, 丁志伟¹, 冯辉¹, 张蔚¹, 储麇¹, 张驰¹

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 近岸地区的潮流不对称影响着沉积物输运和地貌改变。南黄海辐射沙洲海域潮动力强且水动力环境复杂, 分析研究该海域潮流不对称性对海岸带资源的开发与保护有长远意义。本文基于 Delft3D 模型模拟 1984 年、2014 年不同岸线条件下辐射沙洲海域的潮汐潮流运动, 结合调和分析与偏度理论, 分析刻画了不同岸线条件下潮流不对称性的空间分布特征。研究表明: 辐射沙洲海域地形主导的涨落潮流速不对称性 (PCA) 以涨潮占优为主导; 涨落憩历时不对称性 (SWA) 则以涨憩历时短为主导。二者皆主要受半日分潮 (M_2 、 S_2) 和浅水分潮 (M_4 、 MS_4) 的非线性作用影响。1984–2014 年岸线变动后 PCA 正负性不变, 但强度进一步增大, 最大变幅可达 25%; 而 γ_{SWA} 减小, 最大减幅可达 20%, SWA 在辐射沙洲海域涨憩历时短的趋势增加。

关键词: 潮流不对称; 峰值电流不对称; 松弛水不对称; 辐射沙洲; 岸线变迁

中图分类号: P737.17

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)06-0001-09

1 引言

潮流不对称是一种描述河口、近岸水动力特征的现象, 并且对沉积物输送具有重大影响^[1]。因为地形和水深的变化潮波形态由外海到近岸发生改变, 导致涨落潮流速以及憩流历时不对等, 我们把这种现象称作潮流不对称。对于潮流不对称的研究, Friedrichs 和 Aubrey^[2]首先用 M_2 、 M_4 分潮的振幅比 (M_4/M_2) 和相位差 ($2\phi_{M_2} - \phi_{M_4}$) 来描述不对称的程度以及方向。振幅比越大代表潮波的变形程度越高, 相位差在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 为涨潮占优, 在 $180^\circ \sim 360^\circ$ 为落潮占优。Nidzieko^[3] 及 Nidzieko 和 Ralston^[4] 利用统计学中的偏态理论研究了美国西海岸的潮汐不对称和潮流不对称, 研究主要是对潮波主要分潮流 K_1 、 O_1 、 M_2 、 M_4 进行偏度计算, 未能系统地对潮不对称性各贡献来源进行探究。Song 等^[5]基于此理论进一步推导了涨落潮历时不对称性的各项贡献公式, 指出分潮流组合只要

频率满足 $\omega_i = 2\omega_j$ 或 $\omega_i + \omega_j = \omega_k$ 即可对潮汐不对称性产生贡献, 分别揭示了全日潮、半日潮以及超潮和倍潮对于潮汐不对称性的贡献。李谊纯^[6]从三阶原点矩出发推导涨落潮流速不对称性 (Peak-Current-Asymmetry, PCA) 的计算方法, 并将此方法应用于北仑河口的研究。Gong 等^[7]提出把涨落潮历时不对称性计算公式中水位替换成流速加速度即可用来计算涨落憩历时不对称性 (Slack-Water-Asymmetry, SWA)。Guo 等^[8]利用 Delft3D 模型模拟分析了涨落潮流速不对称和涨落憩历时不对称对于地形变化以及海平面上升的响应。陈婷等^[9]利用二维水动力模型, 结合非稳态调和分析方法和偏度方法, 分析研究了长江口潮流不对称性的时空分布规律。

江苏辐射沙洲处于南黄海旋转潮波与东海前进潮波的交汇处, 潮波动力强且水动力环境复杂, 形成独特的水下沙洲地形^[10]。辐射沙洲的存在使得潮波发生形变, 涨潮历时小于落潮历时, 由海向岸历

收稿日期: 2021-06-02; 修订日期: 2021-08-12。

基金项目: 国家自然科学基金(519056611); 国家自然科学基金长江水科学联合基金项目(U2040203)。

作者简介: 冯曦(1987—), 女, 江苏省南京市人, 博士研究生, 主要从事海岸水动力和海岸带灾害研究。E-mail: xifeng@hhu.edu.cn

时差逐渐增大且非线性效应十分显著^[11]。近年来,辐射沙洲海域的大规模围垦导致了该海域的岸线向海推进。岸线变动使得潮波在南黄海近岸涨潮占优的空间占比增加,且在主要潮流通道内涨潮占优愈发明显^[12]。Feng 和 Feng^[13]研究了南黄海潮汐不对称性的内在机制并得出 M_2/M_4 、 $M_2/S_2/MS_4$ 和 $K_1/O_1/M_2$ 之间的非线性相互作用是其主要贡献因子。然而,前人对于该地区潮流不对称性随岸线向海推进而改变的时空分布特征鲜有探索。本文拟通过分析、刻画 1984 年及 2014 年辐射沙洲海域 PCA 与 SWA 的空间分布特征,推求该海域潮流不对称性对于岸线向海推进的响应。

2 研究方法

2.1 模型设置

本文利用课题组前期基于 Delft3D 建立的辐射沙洲海区二维水动力模型^[12]开展分析研究,模型覆盖整个南黄海海域,东部有一段两端接岸的弧形海洋开边界,北、西和南边界都为陆地边界。模型采用曲线正交网格(图 1a),共有 45 539 个网格节点,网格分辨率由外海向近岸增高,外海边界处分辨率最低为 4 500 m,近岸最高分辨率达 500 m。时间步长为 60 s,模型曼尼系数在全局设置为 0.015,不考虑风场压迫的影响,同时假设恒定的温盐场。水深地形(图 1a)数据来源于 Feng 等^[14]。

模型采用冷启动,预留 2 个月冷启动加速时间,每隔 1 h 输出一个数据。开边界处由日本潮汐预报系统 NAOTIDE 预报水位进行驱动。该潮汐预报软件同化了 T/P 卫星高度计和东亚沿岸验潮站观测资料,精度较高。陆边界处分别采用 1984 年及 2014 年两

种岸线条件(图 1c),模型采用临界水深 0.1 m 作为判断干湿的标准,即当水深大于 0.1 m 时为淹滩,反之为露滩。在前期工作中^[12]该模型已经完成了率定工作(水位及流速)且验证效果良好,故此处不再赘述。

2.2 计算方法

本文通过涨落潮流速不对称(PCA)以及涨落憩历时不对称(SWA)两个潮流不对称性指标来量化分析潮流不对称性的趋势。如图 2 流速过程线所示,涨落潮流速不对称表示涨落潮峰值流速大小的不对等(如图 2a,图 2b 绿色标记所示);涨落憩历时不对称表示涨落憩历时的不对等,其中憩流是当涨落潮流交替时,出现短时间近乎停止流动的状态(如图 2c,图 2d 阴影部分所示)。为了计算量化不对称性,Nidzieko 和 Ralston^[4]采用了偏度理论。

$$\gamma(x) = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{\left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{3}{2}}}, \quad (1)$$

式中, γ 是偏度, x_i 是等距(每小时)时间序列中的离散值, \bar{x} 是某时间段内样本的平均值, N 表示样本总数。公式(1)中,当 x_i 表示流速,则 $\gamma(x)$ 可用以计算该时间序列的平均 PCA;而当 x_i 表示流速加速度,则 $\gamma(x)$ 可用以计算对应的 SWA。基于该数学推算, Song 等^[5]首先推导了潮汐历时不对称性可由不同分潮组合来表达。李谊纯^[6]进一步推导出潮流流速不对称偏度 γ_{PCA} 可由分潮组合以及余流项的叠加来刻画; Gong 等^[7]在前二者基础上又导出涨落憩历时不对称偏度 γ_{SWA} 的近似表达式:

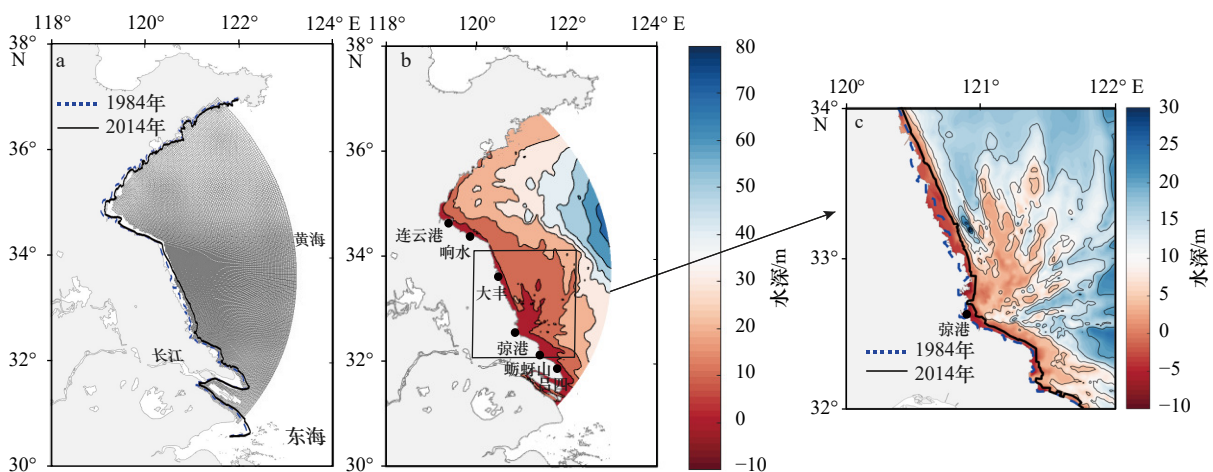


图 1 Delft3D 水动力模型的网格及 1984 年及 2014 年岸线图(a), 黄海海域地形图(b)及辐射沙洲地形图(c)

Fig. 1 Grid domain of Delft3D hydrodynamic model and shorelines in 1984 and 2014 (a), bathymetry of the Yellow Sea (b), and bathymetry of the radial sand ridges (c)

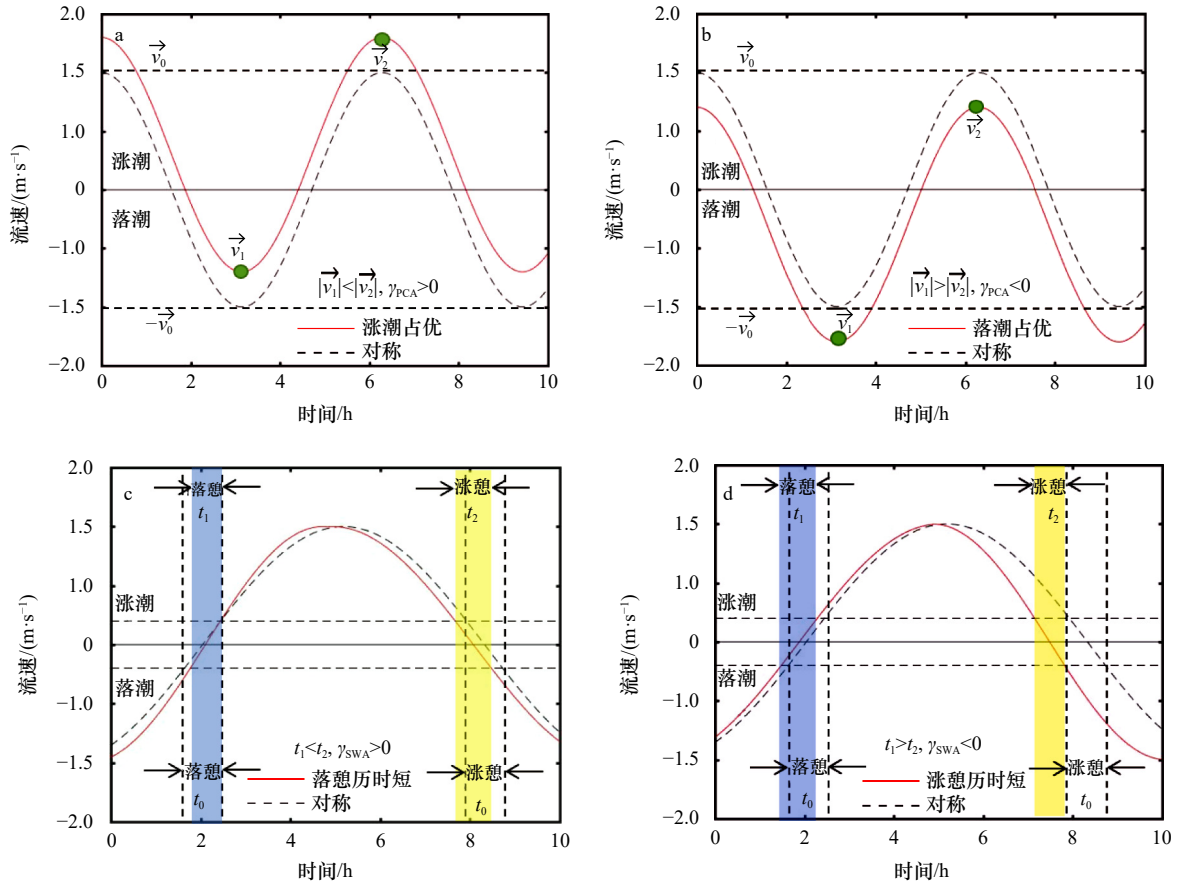


图2 与PCA(a, b)和SWA(c, d)相关的流速过程线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tidal current time series in context of PCA (a, b) and SWA (c, d)

$$\gamma_{PCA} = \frac{\sum_{\omega_i + \omega_j = \omega_k} \frac{3}{2} a_i a_j a_k \cos(\phi_i + \phi_j - \phi_k)}{\left(a_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N a_i^2 \omega_i^2 \right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{\sum_{2\omega_i = \omega_j} \frac{3}{4} a_i^2 a_j \cos(2\phi_i - \phi_j)}{\left(a_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N a_i^2 \omega_i^2 \right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{\sum_{i=1}^N \frac{3}{2} a_i^2 a_0 \cos \phi_0}{\left(a_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N a_i^2 \omega_i^2 \right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{a_0^3 \cos \phi_0}{\left(a_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N a_i^2 \omega_i^2 \right)^{\frac{3}{2}}}, \quad (2)$$

$$\gamma_{SWA} = \frac{\sum_{\omega_i + \omega_j = \omega_k} \frac{3}{2} a_i \omega_i a_j \omega_j a_k \omega_k \sin(\phi_i + \phi_j - \phi_k)}{\left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N a_i^2 \omega_i^2 \right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{\sum_{2\omega_i = \omega_j} \frac{3}{4} a_i^2 \omega_i^2 a_j \omega_j \sin(2\phi_i - \phi_j)}{\left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N a_i^2 \omega_i^2 \right)^{\frac{3}{2}}}, \quad (3)$$

式中, $a_{i,j,k}$ 、 $\omega_{i,j,k}$ 、 $\phi_{i,j,k}$ 分别为潮流流速中分潮的振幅、

频率和相位; a_0 、 ϕ_0 分别为余流的振幅和相位, 当余流为正向时 ϕ_0 取 0° , 反之取 180° [7]。取由外海至近岸方向为正向, $\gamma_{PCA} > 0$ 时, 涨潮最大流速大于落潮最大流速, 涨潮占优 (图 2a); 反之落潮占优 (图 2b)。 $\gamma_{SWA} > 0$ 代表涨憩历时较长 (图 2c); 反之为落憩历时较长 (图 2d)。式 (2) 和式 (3) 也量化了 PCA 和 SWA 各成分的贡献度, 即由于分潮组合的非线性作用造成的潮流偏态。本文过程性实验的主要目标函数为岸线-水下三角洲地形-外海天文潮共同作用所产生的 PCA 或 SWA, 为了明确和量化岸线、地形对 PCA 的影响, 斜压的贡献、气象的强迫、径流的影响忽略不计, 因此 a_0 设为 0。

计算所需的分潮振幅和相位通过 T-TIDE 调和分析获得[15]。本文选取振幅大于 0.1 m/s 的分潮进行计算包括: K_1 、 O_1 、 K_2 、 M_2 、 S_2 、 N_2 、 M_4 、 M_6 、 MS_4 、 MN_4 共 10 个分潮。式 (2) 等式右侧的第三、四项分别表达了余流与分潮的相互作用及余流本身对 PCA 的作用。其中, 余流是指海流中除去周期性潮流的剩余部分, 一般用潮周期内流速的平均值计算。由图 3 可得式 (1) 与式 (2)、式 (3) 不同方法计算所得所有网格点潮流不对称性指标高度吻合, 可由式 (2) 和式 (3) 计算分

析各分潮对潮流不对称性的贡献值。

3 岸线变动对辐射沙洲潮流场的影响

本文取一个涨急、落急时刻的水位和流速来观测岸线变化对辐射沙洲水位和流速分布的影响(图4),

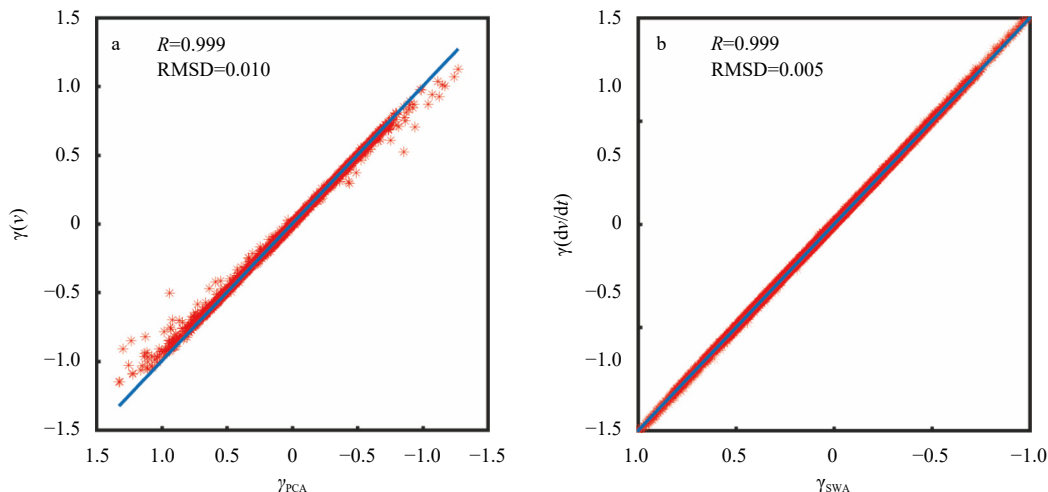


图3 不同公式计算所得 PCA(a)和 SWA(b)散点图

Fig. 3 Scatter diagrams of PCA (a) and SWA (b) calculated by different formulas

红点为模型输出全局各位置处偏态值, 落在蓝线上各点的横纵坐标值相等

The red point is the skewness value at each position of the model output globally.

The horizontal and vertical values of each point on the blue line are equal

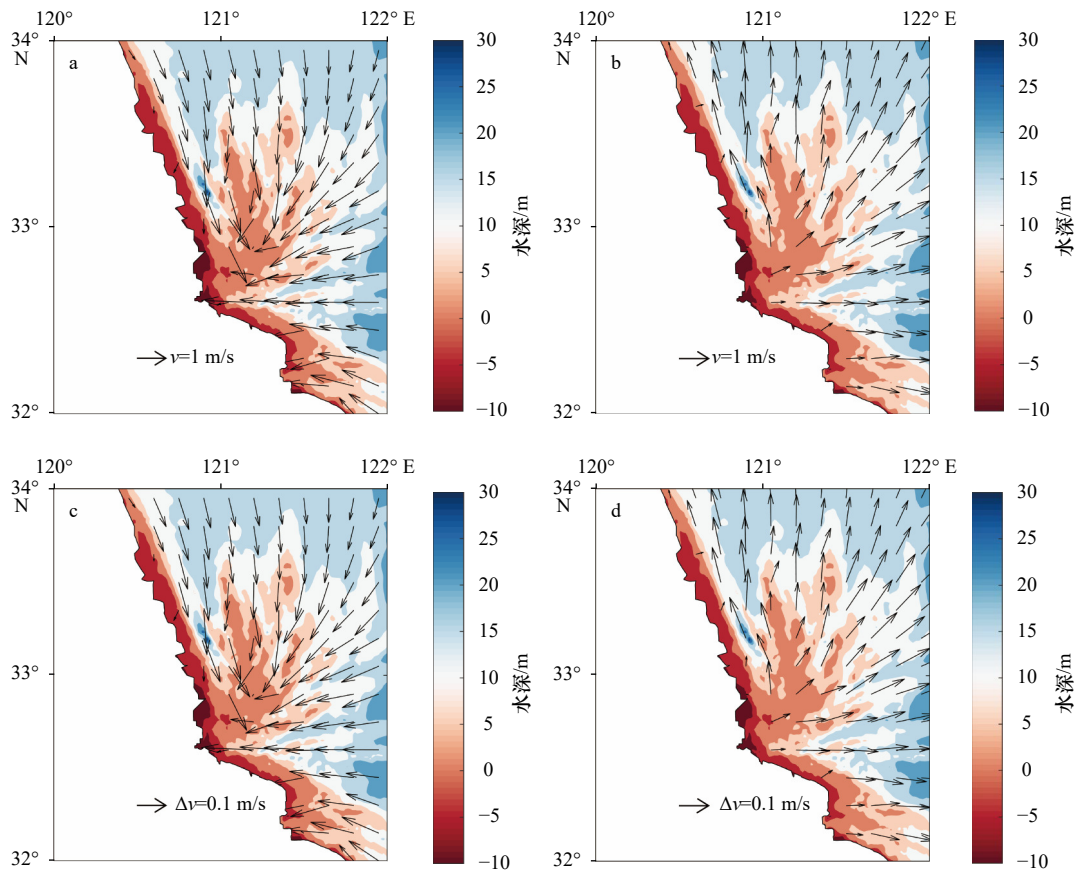


图4 1984年涨急、落急流场分布(a, b)和2014年相较1984年的涨急、落急流速变化(c, d)

Fig. 4 Distribution of flow field at flood and ebb in 1984 (a, b), and changes of flow field at flood and ebb in 2014 as compared to 1984 (c, d)

当辐射沙洲海域处于涨急、落急时刻时,潮流场以琼港为圆心分别呈辐聚、辐散,并且北部流速小于南部流速,潮流通道流速大于沙脊流速。涨潮时因为辐射沙洲水道口的收缩以及相对水深的增加,流速最大可增长至 2.54 m/s;落潮时,流速由琼港向外逐渐增加,在潮流通道中最高可达 2.01 m/s,进入外海后开始减小。岸线变动之后,涨急、落急时刻流速均有不同程度减小,涨急时刻流速最大减小 0.85 m/s,外海受影响较小,减幅小于 0.1 m/s;近岸受影响较大,辐射沙洲海域减小幅度在 0.3~0.85 m/s 之间。落急时刻流速最大减小 0.66 m/s,减小幅度自近岸向外海由 0.66 m/s 减小至 0 m/s。

4 岸线变动对辐射沙洲潮流不对称性的影响

4.1 岸线变动对涨落潮流速不对称的影响

图 5a 显示了 2014 年岸线下辐射沙洲 PCA 的空间分布。该海域东北部外海呈落潮占优, γ_{PCA} 在 -0.5~0 之间;北部大丰港区与南部吕四港区呈涨潮占优, γ_{PCA} 在 0~0.5 之间。沙洲海域整体呈涨潮占优且潮流

通道正不对称性强于沙脊,不对称性由外向内逐渐增加;但其中部分沙脊及沙洲中心区域呈落潮占优。潮流通道正不对称性自外海向近岸增长, γ_{PCA} 最高可达 1.27;而沙洲中心呈强烈负不对称, γ_{PCA} 最小可达 -1.33。由图 5b 可见,1984 年至 2014 年由于岸线向海推进,东北部外海 γ_{PCA} 减小,而北部沿岸及南部近岸海域 γ_{PCA} 增加,变幅在 ± 0.1 以内。在辐射沙洲顶端 γ_{PCA} 变幅相对明显,最大可至 ± 0.5 。岸线变动导致涨潮占优海域 γ_{PCA} 增加,而落潮占优海域 γ_{PCA} 减小。因此,岸线变动并不改变辐射沙洲海域 PCA 的性质,仅增大了不对称性的强度。由图 5c 可见,该海域 PCA 西北部主要由 M_2/M_4 控制,东南部近外海 $M_2/S_2/MS_4$ 分潮组合的非线性贡献突出。图 5c 与图 5d 对比可得,岸线变动后 PCA 主要贡献项分布受影响较小。

4.2 岸线变动对于涨落憩历时不对称的影响

图 6a 显示了 2014 年岸线下辐射沙洲 SWA 的空间分布。SWA 在辐射沙洲中部(以东沙为例)呈明显的涨憩历时较短态势,且沙脊比潮流通道负不对称更为显著。 γ_{SWA} 自外海向内减小,最小可达 -0.8。此外,北部沿岸呈涨憩历时也较短, γ_{SWA} 最小可至 -0.6;在辐

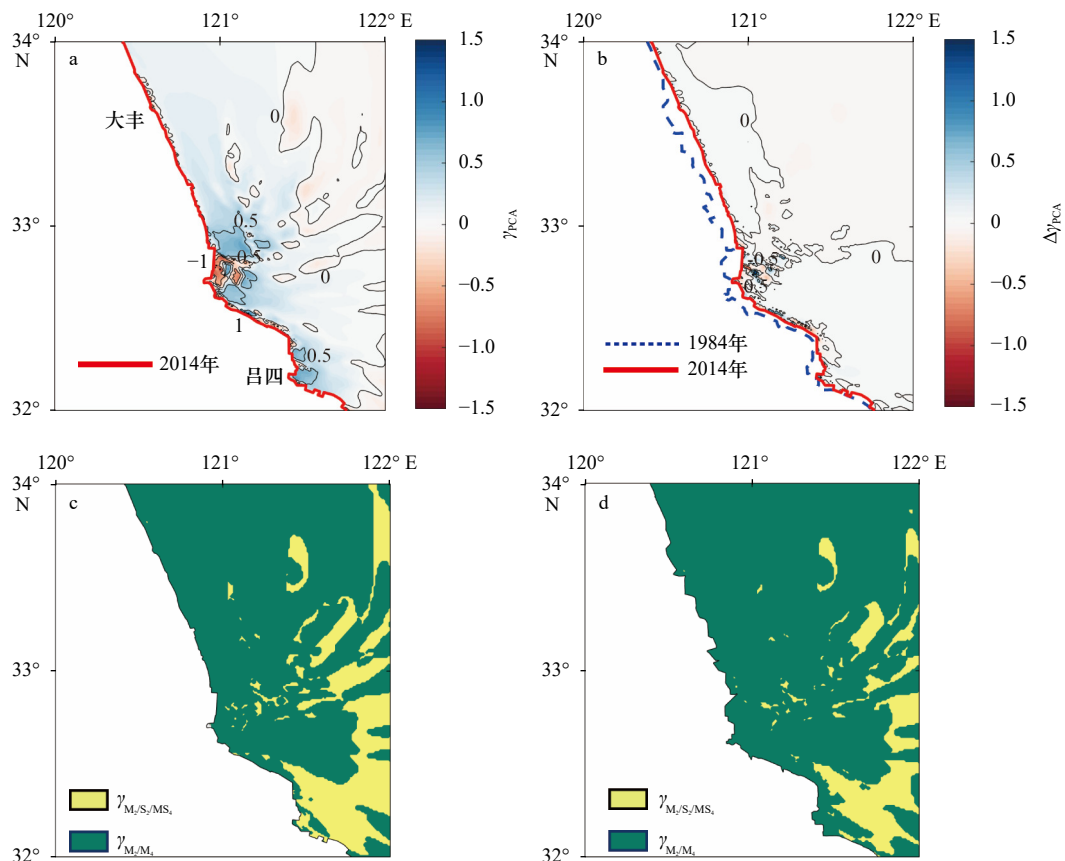


图 5 2014 年 PCA 分布(a), 2014 年较 1984 年 PCA 变化分布(b), 2014 年 PCA 最大贡献项空间分布(c)及 1984 年 PCA 最大贡献项(d)空间分布

Fig. 5 Distribution of PCA in 2014 (a), distribution of PCA-changes in 2014 compared to 1984 (b), spatial distribution of the largest contributors to PCA in 2014 (c), and spatial distribution of the largest contributors to PCA in 1984 (d)

射沙洲顶端和南部部分岸段 SWA 涨憩历时较长, γ_{SWA} 最大可达 0.6。由图 6b 可得, 岸线变动后, γ_{SWA} 在大部分海域减小, 在靠近岸线处变化剧烈, 增减幅可至 ± 0.2 。岸线变动使得辐射沙洲海域落憩历时增长趋势愈发显著。由 2014 年 SWA 最大贡献项分布图

(图 6c, 图 6d) 可得, 辐射沙洲北部 SWA 主要由 M_2/M_4 控制, 而在南部海域 $M_2/S_2/MS_4$ 贡献突出。同时, SWA 主要贡献项(即 M_2/M_4 分潮组合)所控制的海域面积在 2014 年岸线条件下(图 6c)较 1984 年岸线条件下(图 6d)有所增大。

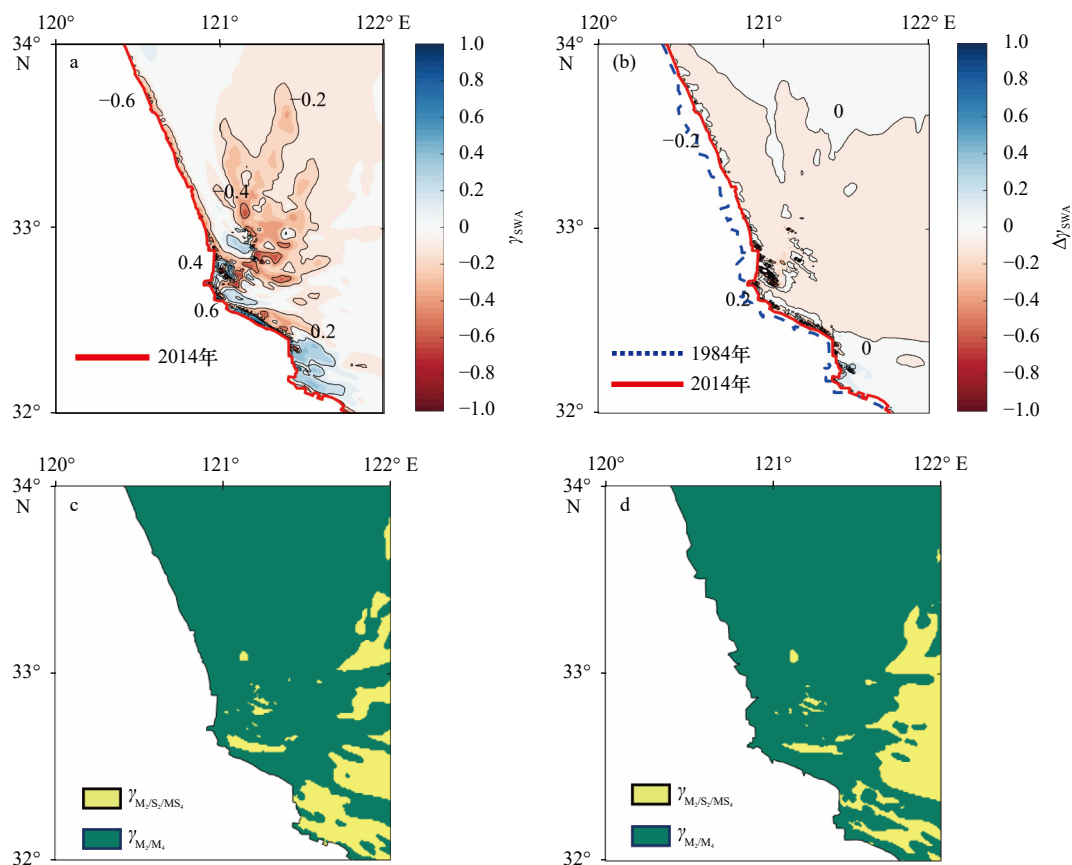


图 6 2014 年 SWA 分布(a), 2014 年较 1984 年 SWA 变化分布(b), 2014 年 SWA 最大贡献项空间分布(c)及 1984 年 SWA 最大贡献项空间分布(d)

Fig. 6 Distribution of SWA in 2014 (a), distribution of SWA-changes in 2014 compared to 1984 (b), spatial distribution of the largest contributor to SWA in 2014 (c), and spatial distribution of the largest contributor to SWA in 1984 (d)

5 辐射沙洲潮流不对称性变化的影响机制

5.1 辐射沙洲涨落潮流速不对称的影响机制

辐射沙洲海域 PCA 的最主要贡献项为分潮非线性作用项 $M_2/S_2/MS_4$ 以及 M_2/M_4 。 $M_2/S_2/MS_4$ 组合在东北外海贡献负不对称性, $\gamma_{M_2/S_2/MS_4}$ 最小可达 -0.2; 近岸区域主要贡献正不对称性, $\gamma_{M_2/S_2/MS_4}$ 最大可达 0.4; 在沙洲中心贡献负不对称性, $\gamma_{M_2/S_2/MS_4}$ 最小可达 -0.49(图 7a)。 M_2/M_4 组合贡献主要为正, 沿西北与东南近岸两条潮流通道的自外向内逐渐增加, γ_{M_2/M_4} 最大可达 0.56; 在沙洲中心部分地区贡献呈负, γ_{M_2/M_4} 最小可达 -0.6(图 7b)。 而岸线自 1984 年至 2014 年向海推移后 $M_2/S_2/MS_4$ 与

M_2/M_4 的贡献变化趋势较为类似, 不对称性均在东北部外海呈减小趋势, 在南部和沿岸呈增加趋势, 变动最大可达 ± 0.2 。 因此, 岸线的变化并不改变各项贡献的性质, 但增加了外海和近岸 PCA 的强度。 经调查, 上述贡献项的变化主要源于岸线变动对 M_2 分潮流速的影响。 其中, M_2 分潮流速最大振幅由 1.6 m/s 减小到 1.5 m/s, 而 S_2 分潮流速基本不变。

5.2 辐射沙洲涨落憩历时不对称的影响机制

辐射沙洲海域 SWA 的最主要贡献项为分潮非线性作用项 $M_2/S_2/MS_4$ 以及 M_2/M_4 。 $M_2/S_2/MS_4$ 以及 M_2/M_4 在沙洲北部海域的贡献度均为负 ($\gamma_{M_2/S_2/MS_4} < 0$, $\gamma_{M_2/M_4} < 0$), 最小分别可达 -0.36 以及 -0.60(图 8a, 图 8b)。 而在沙洲南部 $\gamma_{M_2/S_2/MS_4} > 0$, 且绝对值大于 M_2/M_4 所贡献的

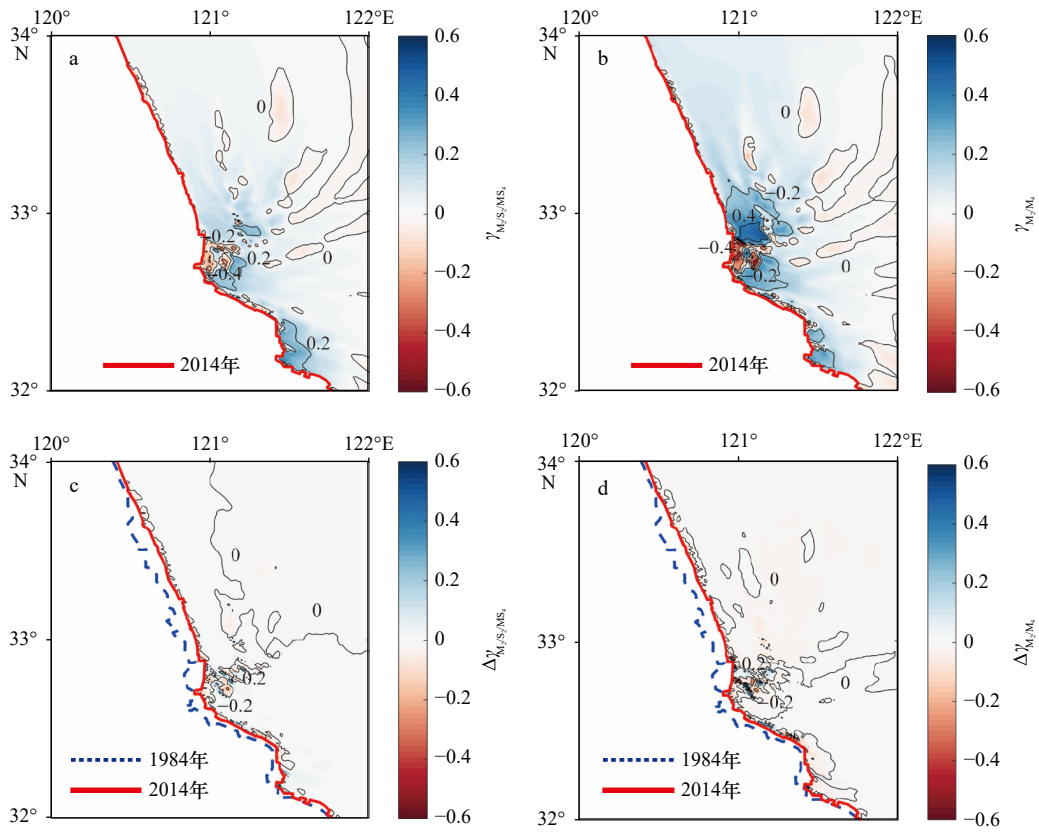


图7 2014年PCA各项分布(a, b)和2014年较1984年PCA各项变化分布(c, d)

Fig. 7 Distribution of PCA contributors in 2014 (a, b) and distribution of PCA contributors changes in 2014 compared to 1984 (c, d)

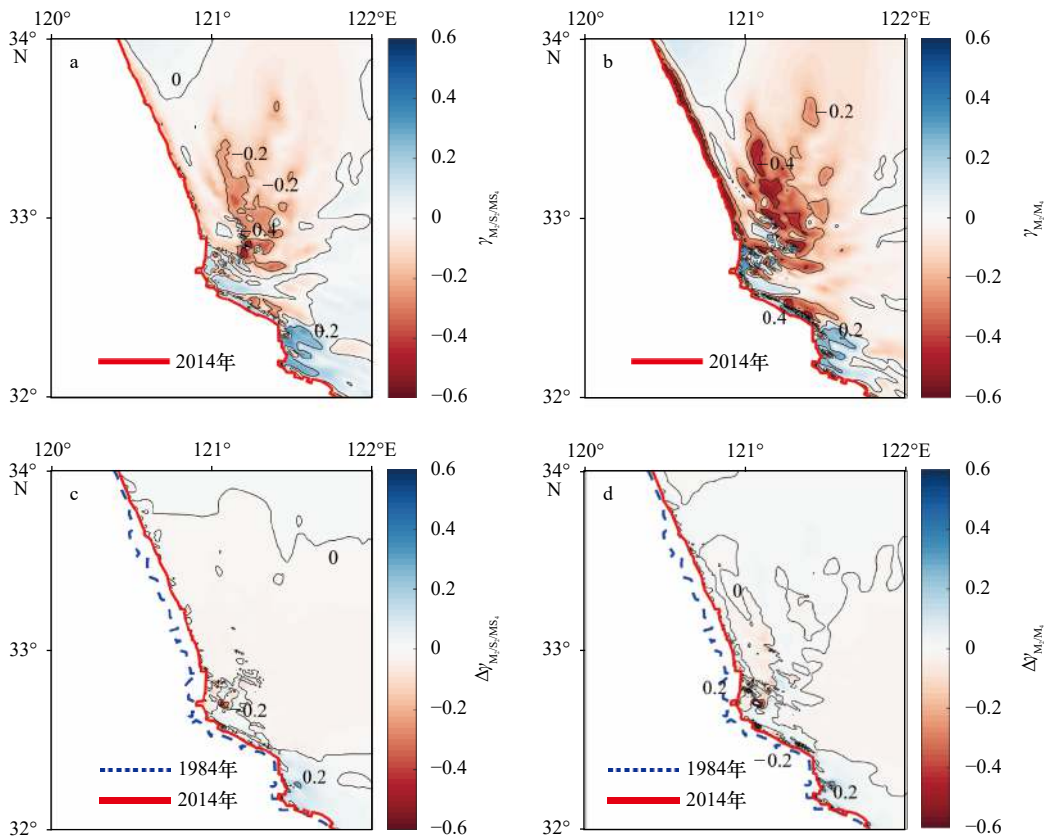


图8 2014年SWA各项分布(a, b)和2014年较1984年SWA各项变化分布(c, d)

Fig. 8 Distribution of SWA contributors in 2014 (a, b) and distribution of SWA contributors changes in 2014 compared to 1984 (c, d)

负不对称性,使得辐射沙洲南部整体落憩历时较短($\gamma_{SWA}>0$)。岸线自 1984 年至 2014 年变动后 $\gamma_{M_2/S_2/MS_4}$ 在大部分辐射沙洲海域减小(图 8c)。与此同时, γ_{M_2/M_4} 在辐射沙洲南翼(以烂沙洋为主)以及北部西洋水道也呈减小趋势(图 8d),这使得该海域 SWA 落憩历时增长的趋势愈发显著,这与岸线变动所致 M_2 分潮流速减小相关。

6 结论

本文通过建立南黄海水动力模型,模拟了 1984 年、2014 年辐射沙洲逐时流速场。通过结合调和分析及偏度计算方法,本文分析了由于天文潮和辐射沙洲特殊地形所致的潮流流速不对称和涨落憩不对称的空

间分布特征,得到以下结论。

(1)PCA 在辐射沙洲海域主要呈涨潮占优($\gamma_{PCA}>0$),在中部核心区域和两岸涨潮占优较突出,但在辐射沙洲顶端仍有落潮占优($\gamma_{PCA}<0$)区域存在;自 1984 年至 2014 年,岸线向海推进并不改变该海域 PCA 的整体态势;但增强了近岸涨潮占优、远岸落潮占优的趋势。

(2)SWA 在辐射沙洲海域主要呈涨憩历时较短($\gamma_{SWA}<0$),在以沙脊为主的浅水海域(如东沙)尤为突出;自 1984 年至 2014 年,因岸线向海推进使得辐射沙洲中部 SWA 涨憩历时较短趋势愈发显著。

(3)该海域由地形主导的 PCA 及 SWA 生成及演变的主要贡献项均为 M_2/M_4 ,在辐射沙洲南部则由 $M_2/S_2/MS_4$ 主导。

参考文献:

- [1] Toublanc F, Brenon I, Coulombier T, et al. Fortnightly tidal asymmetry inversions and perspectives on sediment dynamics in a macrotidal estuary (Charente, France)[J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 94: 42–54.
- [2] 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(5): 521–545.
- [3] Nidzieko N J. Tidal asymmetry in estuaries with mixed semidiurnal/diurnal tides[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C8): C08006.
- [4] Nidzieko N J, Ralston D K. Tidal asymmetry and velocity skew over tidal flats and shallow channels within a macrotidal river delta[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C3): C03001.
- [5] Song Dehai, Wang Xiaohua, Kiss A E, et al. The contribution to tidal asymmetry by different combinations of tidal constituents[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C12): C12007.
- [6] 李谊纯. 一个潮流不对称计算方法及其在北仑河口的应用[J]. *海洋工程*, 2014, 32(4): 110–116.
Li Yichun. A method of quantifying tidal current asymmetry and its application in the Beilun River estuary[J]. *The Ocean Engineering*, 2014, 32(4): 110–116.
- [7] Gong Wenping, Schuttelaars H, Zhang Heng. Tidal asymmetry in a funnel-shaped estuary with mixed semidiurnal tides[J]. *Ocean Dynamics*, 2016, 66(5): 637–658.
- [8] Guo Leicheng, Brand M, Sanders B F, et al. Tidal asymmetry and residual sediment transport in a short tidal basin under sea level rise[J]. *Advances in Water Resources*, 2018, 121: 1–8.
- [9] 陈婷, 张蔚, 季小梅, 等. 长江口潮流不对称时空分布特征[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(4): 7–12, 18.
Chen Ting, Zhang Wei, Ji Xiaomei, et al. Spatial-temporal characteristics of tidal current asymmetry in the Yangtze River estuary[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(4): 7–12, 18.
- [10] 任美镔. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1985: 120–133.
Ren Meie. Report for Comprehensive Investigation on Recourses of Coastal Zones and Tidal Flats in Jiangsu Province[M]. Beijing: China Ocean Press, 1985: 120–133.
- [11] 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[J]. *科学通报*, 2018, 63(27): 2904–2918.
Yuan Jinjin, Feng Xi, Feng Weibing. Effects of radial sand ridges on tidal process in the South Yellow Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(27): 2904–2918.
- [12] 钱沛, 冯曦, 冯卫兵, 等. 辐射沙洲海域潮汐不对称对岸线变化的响应[J]. *水利水运工程学报*, 2020(3): 51–60.
Qian Pei, Feng Xi, Feng Weibing, et al. Response of tidal asymmetry to coastline changes in radial sand ridges sea area[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(3): 51–60.
- [13] Feng Xi, Feng Hui. On the role of anthropogenic activity and sea-level-rise in tidal distortion on the open coast of the Yellow Sea Shelf[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2021, 126(3): e2020JC016583.
- [14] Feng Xi, Feng Hui, Li Huichao, et al. Tidal responses to future sea level trends on the Yellow Sea shelf[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2019, 124(11): 7285–7306.
- [15] Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. *Computers & Geosciences*, 2002, 28(8): 929–937.

Responses of tidal-current-asymmetry to shoreline variation in radial sand ridges in the South Yellow Sea

Feng Xi¹, Ding Zhiwei¹, Feng Hui¹, Zhang Wei¹, Chu Ao¹, Zhang Chi¹

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

Abstract: Tidal-current-asymmetry (TCA) influences sediment transport and geomorphologic changes. It is of paramount importance to understand the current asymmetry in this area in context of a long-term scale with consideration of development and protection of the coastal resources. The radial sand ridges (RSR) in the South Yellow Sea is patterned with strong tidal forcing and complex hydrodynamic environment. This paper simulated tidal current field in the RSR based on the Delft3D model and used combined harmonic analysis and skewness theory to analyze the spatial distribution of the TCA under varied shoreline conditions. The results show that peak-current-asymmetry (PCA) in the RSR is mostly flood-dominant and slack-water-asymmetry (SWA) also shows positive, meaning the flooding duration is shorter than the ebbing duration. Both the positively-dominant PCA and negatively-dominant SWA are mainly affected by the nonlinear interactions between the semidiurnal diurnal tides (M_2 , S_2) and shallow water tides (M_4 , MS_4). As the shoreline gradually moves towards sea during 1984 to 2014, although the nature of γ_{PCA} remains, the magnitude of which increases by up to 25%. Meanwhile, γ_{SWA} decreases by up to 20%, which intensifies its shorter-flooding-duration pattern in the core area of the RSR.

Key words: tidal-current-asymmetry; peak-current-asymmetry; slack-water-asymmetry; radial sand ridges; shoreline-change