

朱明权, 岑显荣, 鲁远征, 等. 基于浮标观测的南海西沙群岛潟湖区潮流特征研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(9): 55–62, doi:10.12284/hyxb2022119

Zhu Mingquan, Cen Xianrong, Lu Yuanzheng, et al. Study on tidal characteristics of coral reef lagoon of Xisha Islands in the South China Sea based on mooring observation[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(9): 55–62, doi:10.12284/hyxb2022119

基于浮标观测的南海西沙群岛潟湖区潮流特征研究

朱明权^{1,7}, 岑显荣⁴, 鲁远征^{1,2,3}, 郭双喜^{1,2,3,7}, 屈玲⁵, 黄鹏起^{1,2,3},
方文东^{1,2,7}, 陈举^{1,2,6}, 周生启^{1,2,3,7*}

(1. 中国科学院南海海洋研究所 热带海洋环境国家重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458; 3. 中国科学院南海生态环境工程创新研究院, 广东 广州 510301; 4. 佛山科学技术学院 工业设计与陶瓷艺术学院, 广东 佛山 528225; 5. 湖北省地质局地球物理勘探大队, 湖北 武汉 430056; 6. 中国科学院南海海洋研究所 海南西沙海洋环境国家野外科学观测研究站, 广东 广州 510301; 7. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文利用南海西沙群岛潟湖区 29 d 的全水深浮标观测资料研究了潟湖区内正压潮和内潮的基本特征, 采用深度平均方法分析海流的适用性, 并讨论潟湖区内潮的主要来源。深度平均流的动能谱显示全日潮流占主导, 其动能占整体海流动能的 41%。对比分析深度平均流和 Tpxo7.2 模式预测的全日、半日潮流的调和常数, 两者均表明全日正压潮流受地形调制, 主轴方向为西北-东南向, 而半日正压潮流主轴方向为东-西向。两种方法得到的全日正压潮流大-小潮存在半个相位 (6~7 d) 的差异, 进一步分析发现全日正压潮和全日内潮潮龄不同, 存在部分相互抵消, 且全日内潮大潮发生时间在深度上存在差异, 推测由于缺少海表和海底的测量数据, 导致深度平均方法得到的全日正压潮仍然包含全日内潮信号。调和分析结果表明, 全日内潮的动能中相干部分占比高达 91%, 说明潟湖区的全日内潮是正压潮与局地岛礁地形相互作用产生, 而从远场传播而来的可能性很小。

关键词: 潟湖; 内潮; 相干内潮; 正压潮

中图分类号: P731.23

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)09-0055-08

1 引言

内波(IW)是海洋中普遍存在的波动现象^[1], 也是海洋物质和能量运输的重要载体。内波可分为具有天文潮频率的内潮(IT)、具有局地近惯性频率的近惯性内波以及高频非线性内波等。内波不仅影响着海洋的湍流混合^[2]、营养物质的运输^[3], 并且对海洋工程设施、潜艇航行有重大威胁^[4]。

南海由于其特殊的地理条件, 内波活动十分活跃, 成为研究内波的天然实验场。前人已在南海开展许多重大内波观测实验和相关的研究工作。如亚洲海国际声学实验(Asian Seas International Acoustics Experiment, ASIAEX)^[5]和海峡内波实验(Internal Waves in Straits Experiment, IWISE)^[6]聚焦吕宋海峡和南海北部进行了一系列内波研究。太平洋通过吕宋海峡西传进入南海的潮汐能量十分巨大, K_1 、 O_1 、 M_2 、 S_2 分

收稿日期: 2021-07-03; 修订日期: 2022-01-29。

基金项目: 国家重点研发项目(2021YFC3101303); 国家自然科学基金(12172369, 91952106, 42006196); 海南省自然科学基金(422QN439); 海南省科技专项基金(ZDYF2021GXJS217); 广东省基础及应用基础研究基金(2021A1515110839); 南方海洋科学与工程广东实验室引进人才重点专项(GML2019ZD0304, SMSEGL20SC01); 中国科学院南海生态与环境工程研究院(ISEE2021PY01); 热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所)开放课题(LTO2219)。

作者简介: 朱明权(1997—), 男, 浙江省苍南县人, 从事海洋底边界层研究。E-mail: zhumingquan19@mails.ucas.ac.cn

* **通信作者:** 周生启, 男, 研究员, 主要从事深海海洋对流的动力演化过程及中小尺度海洋过程所引起的海洋混合和运输研究。E-mail: sqzhou@scsio.ac.cn

潮的能通量分别为 28 GW、21 GW、29 GW 和 3 GW^[7]。吕宋海峡的海脊复杂地形使正压潮向内潮转化的能量为 35 GW, 其中 9 GW 在吕宋海峡局地耗散, 26 GW 向南海和太平洋辐射^[6]。Alford 等^[8]基于吕宋海峡的现场观测资料, 估算西传的能量通量为 (40 ± 8) kW/m。Zhao 等^[9]基于现场观测发现南海西北部的全日内潮受到吕宋海峡西传的全日内潮影响, 而半日内潮主要由北部的陆架断裂带生成。为研究南海北部内潮的时间变化特征, 一般将内潮分为相干和非相干两部分^[10], 非局地生成的内潮具有显著的非相干性^[11]。前人的观测研究均表明, 当内潮从吕宋海峡传播至南海北部陆坡、陆架区时, 随着与源区距离的增加, 内潮在传播过程中与中尺度涡和背景层结相互作用, 改变了内潮的相位和频谱上的能量分布^[10], 使其非相干性呈现增加趋势^[12-14]。

吕宋海峡西传内潮不仅影响海洋混合在南海北部的空间分布, 还影响了东沙群岛周边珊瑚礁的生态。内潮周期性驱动冷水冲刷珊瑚, 缓解了由于海表温度上升所造成的影响, 减轻了珊瑚的生长压力^[15]。内潮还给微生物带来生长所需的营养物质, 促进珊瑚礁生态的发展^[3, 16]。Wu 等^[17]通过数值模拟研究表明, 西沙群岛的局地地形与正压潮的相互作用产生内潮, 对岛礁周边丰富的珊瑚生态系统有着重要影响。但在西沙群岛内的观测研究工作相对稀少, 近年来仅邓晓东等^[18]通过观测发现台风过境时, 会增强西沙海域的近惯性能量。因此, 有必要在西沙群岛内进行更多的海洋水文观测, 为研究岛礁的地质和生态系统构建物理动力框架。

本文基于西沙群岛潟湖区 29 d 的观测资料, 研究

了潟湖区内正压潮和内潮的基本特征, 讨论了深度平均分析海流方法的适用性, 并探讨全日内潮的主要来源。

2 数据与方法

2.1 浮标观测资料

2018 年 8 月 3-31 日在南海西沙群岛潟湖区进行了 29 d 的全水深浮标观测。该浮标观测地点的经纬度为 16.90°N , 112.23°E (图 1a), 水深为 69 m。浮标观测系统(图 1b)包括一个 2 m 高的坐底式三脚架和 80 m 长的温度链。坐底式三脚架搭载一个上视的 300 kHz 声学多普勒流速剖面仪(ADCP)和一个下视的高频 ADCP(Signature1000), 斜杆上搭载一个距底 0.78 m 的 seabird SBE-37SM 型 CTD(Conductivity Temperature Depth Profiler), 以及垂直杆上搭载有 24 个温度记录仪(广州欧纳电子科技有限公司)。在上方 80 m 的温度链上, 搭载有 34 个温度记录仪和一个 CTD37(距底 40 m)。本文分析上视 ADCP 和底部 CTD 的观测数据研究潮流。上视的 ADCP 观测流速共 54 层, 层间距为 2 m, 采样间隔为 3 min, 观测盲区为 4.27 m, 有效数据为 1~29 层, 对应观测深度为 8~64 m。底部 CTD 的采样时间间隔为 6 s, 记录海水的温度、盐度以及压强等数据资料。地形图使用了高分辨率(1') 的 ETOPO1 数据, 下载地址为: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>。

2.2 内波信号的提取

内波的频率范围为 $[f, N]$ (f 是惯性频率, N 是浮力频率), 其中潮频率的内波即为内潮。从观测流速中提取内波信号, 首先需要分离正压和斜压部分, 若观

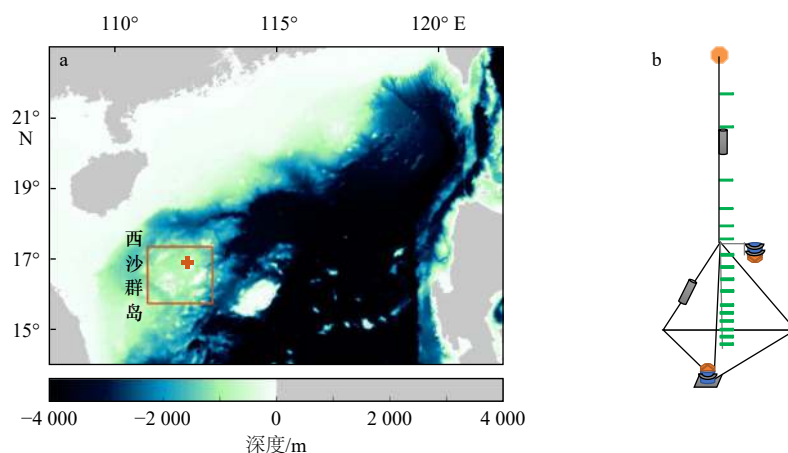


图 1 南海地形图(a)和浮标示意图(b)

Fig. 1 Bathymetry of the South China Sea (a) and mooring diagram (b)

红色方框表示西沙群岛, 红色十字表示浮标观测点

Red square represents Xisha Islands, red cross represents location of the mooring

测的流速覆盖全水深,对观测流速进行深度平均得到正压流^[14]。还可以通过全球正压模型 Tpxo7.2^[19]得到正压潮流部分^[12],观测潮流减去正压潮流,得到内潮(斜压潮流)。进一步对内潮进行调和分析,得到相干内潮,剩余部分为非相干内潮。

2.2.1 基于深度平均流计算的内潮

对观测时间内的原始流速 $u(z, t)$ 进行深度平均得到正压流速 $u_{br}(z, t)$ ^[20-23],再将原始流速减去正压流速即可得到斜压流速 $u_{bc}(z, t)$ 假设海水的深度为 H ,则正压流速和斜压流速可以表示为

$$u_{br} = \frac{1}{H} \int_{-H}^0 u(z, t) dz, \quad (1)$$

$$u_{bc}(z, t) = u(z, t) - u_{br}(z, t). \quad (2)$$

为了提取出不同频带流速信号,本文利用4阶 Butterworth 滤波器对流速进行带通滤波。如图2所示,对深度平均流速进行动能谱分析,确定滤波的频率带:全日频率带 [0.8, 1.15] cpd, 半日频率带 [1.76, 2.15] cpd, 近惯性频率带 [0.85*f*, 1.2*f*] (*f*为观测位置的局地惯性频率, $f=0.5832$ cpd, $1 \text{ cpd} = 2\pi/86400 \text{ s}^{-1}$)。再对斜压流速 $u_{bc}(z, t)$ 进行上述不同频率带的带通滤波,得到相应的全日内潮(dIT)、半日内潮(sdIT)和近惯性内波(niIW)的流速。

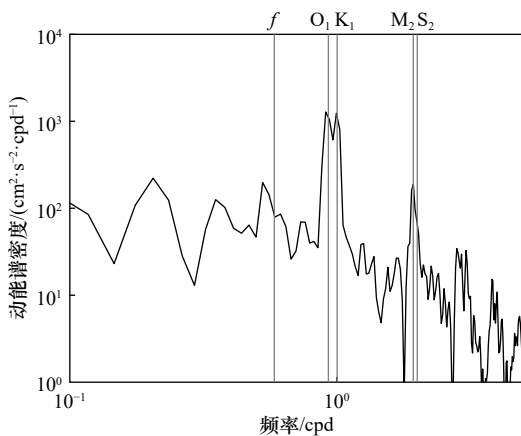


图2 深度平均流的动能谱
Fig. 2 Power spectra of the depth-averaged current

2.2.2 基于 Tpxo7.2 模式正压潮流计算的内潮

另一种方法是采用全球正压模型 Tpxo7.2 潮汐模式^[19]预测的正压潮流和潮位数据(包含11个主要分潮),包含全日正压潮(O_1 、 K_1 、 N_1 、 P_1)和半日正压潮(M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2)。将观测流速带通滤波,得到全日潮流和半日潮流,再将其分别减去模式对应的全日正压潮和半日正压潮,得到全日内潮和半日内潮。

2.2.3 相干和非相干内潮的计算

正压潮的各分潮在频谱上表现为窄频带的峰值,

而与地形、层结和中尺度涡等的相互作用使内潮能量具有间歇性以及相位具有不稳定性,在频谱上可能会出现宽频带的峰值。调和分析的计算公式为

$$u_0 = \sum_n U_n \cos(\psi_n + \sigma_n t), \quad (3)$$

式中, u_0 为原始流速; U_n 、 ψ_n 和 σ_n 分别为各个分潮的振幅、相位以及频率,下文的计算选取了 O_1 、 K_1 、 M_2 和 S_2 4个分潮。

对内潮进行调和分析,获得内潮中的相干部分(相干内潮, cIT),内潮减去其相干部分,得到非相干部分(非相干内潮, icIT)^[10]。一般来说 cIT 接近其生成源地,与当地的天文潮的相位差保持不变, icIT 则是非局地的内潮,其相位变化不稳定。本文使用了 u_tide^[24] 工具包(集合了 t_tide, r_t_tide 和 versatile tidal analysis 等工具包内的函数)进行调和分析的计算。

3 结果与讨论

3.1 正压潮流特征

前人在南海的观测研究表明,全日潮强于半日潮。如图2所示,全日潮流在整体海流中占主导,半日潮流和近惯性流较弱。对动能谱积分,得到全日潮流动能占总动能的41%,半日潮流和近惯性流仅占总动能的6%、5%。

比较观测和模式的4个主要分潮的正压潮流椭圆。如图3所示,观测和模式结果均显示4个分潮的长轴大小依次为 K_1 、 O_1 、 M_2 、 S_2 ,全日分潮 O_1 、 K_1 明显大于半日分潮 M_2 、 S_2 ,说明在观测海区,全日潮流占主导,半日潮流较弱,与图2动能谱结果一致。全日分潮的短轴均为负值,而半日分潮的短轴均为正值,表明全日潮流(O_1 、 K_1)为顺时针旋转,半日潮流(M_2 、 S_2)为逆时针旋转。对 O_1 、 K_1 分潮来说,观测与模式预报结果的长短轴、倾角基本一致,而相位结果相差较大。 M_2 分潮的长短轴,倾角和相位都比较接近,但是 S_2 分潮则是倾角和相位接近,长短轴的差异较大,模式结果的 S_2 分潮长短轴比观测结果小1个量级。

如表1、表2所示,全日分潮 O_1 、 K_1 潮流椭圆的倾角为 $[148^\circ, 164^\circ]$,呈西北-东南走向,说明 O_1 、 K_1 在涨落潮时的主要流向为西北-东南流向。同时浮标观测点处的沿等深线的方向与正东方向夹角为 133° ,两者的角度较为接近,说明地形对全日潮流(O_1 、 K_1)起到了调制作用。而半日分潮 M_2 、 S_2 的倾角为 $[-1^\circ, -14^\circ]$,呈东西走向,在涨落潮时主要流向为东-西流向。

如图4a和图4b所示,深度平均方法获得的全日正压潮和模式预测的全日正压潮的流速存在一些异同。第215~222天,全日周期的相位基本一致,但在

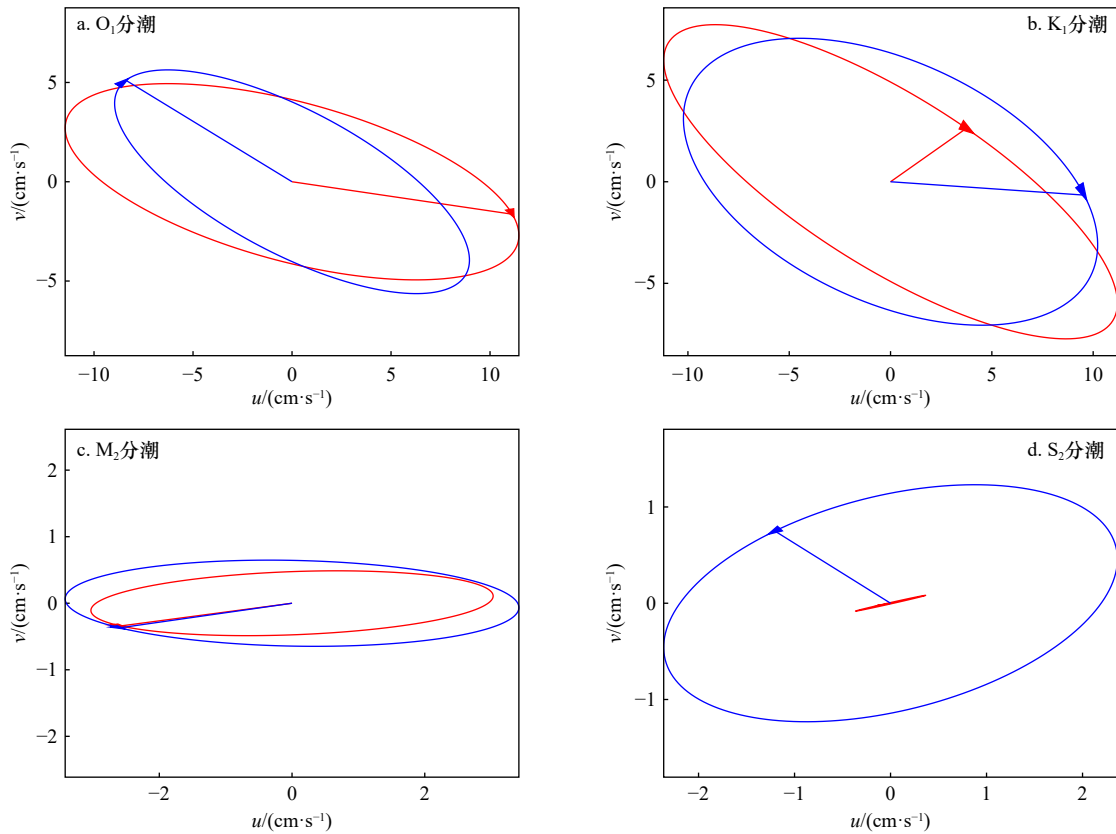


图 3 正压潮 4 个主要分潮的潮流椭圆

Fig. 3 The ellipses of four dominant barotropic tidal currents

蓝线: 深度平均; 红线: 模式预报

Blue line: depth-averaged; red line: predicted by model

表 1 深度平均流的主要分潮的椭圆要素

Table 1 Elliptical elements of four major constituents of depth-averaged currents

分潮	长轴/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	短轴/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	倾角/($^\circ$)	迟角/($^\circ$)
O_1	9.95	-3.62	152.24	350.27
K_1	10.91	-5.94	155.35	214.78
M_2	3.42	0.64	178.86	319.17
S_2	2.42	1.12	13.99	245.89

表 2 模式预测的主要分潮的椭圆要素

Table 2 Elliptical elements of four major constituents of model

分潮	长轴/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	短轴/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	倾角/($^\circ$)	迟角/($^\circ$)
O_1	11.81	-4.01	164.95	199.07
K_1	12.92	-4.25	148.06	262.06
M_2	3.03	0.47	2.10	148.73
S_2	0.37	0.01	12.62	248.55

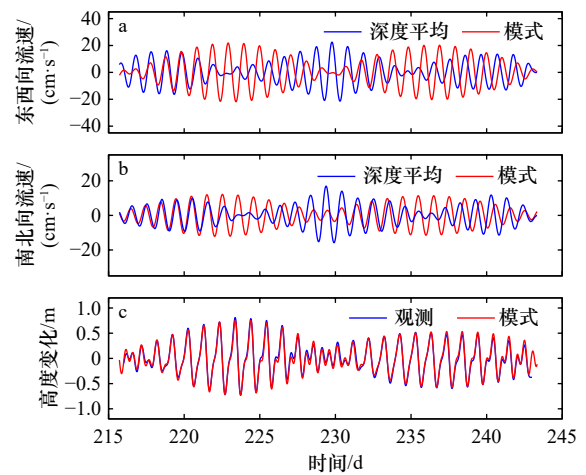


图 4 正压潮的时间序列

Fig. 4 Time series of barotropic current

蓝线: 观测的全日潮; 红线: 模式预测的全日潮。a. 东西方向的速度; b. 南北方向的速度; c. CTD 观测的海底压强变化和模式预测的海平面高度变化的时间序列

Blue lines: observed diurnal tides; red lines: diurnal tides predicted by model. a. East-west velocity; b. north-south velocity; c. time series of sea bottom pressure measured by CTD and sea level height predicted by model

222 d 之后, 全日周期的相位开始发生偏移, 该差异在图 3a 和图 3b 中也有所体现。二者的东西向流速 u 的

振幅均大于南北向流速 v 的振幅, u 、 v 都受到大-小潮的调制, 振幅存在近 14 d 的周期变化。不同的是, 两者的大、小潮的相位相差了近半个相位(6~7 d)。深度平均结果在小潮(230 d)前后, 流速出现最大值, 在大潮(223 d、237 d)前后, 流速反而出现了最小值。

通常情况下, 正压潮的潮位变化和海底压强的变化是接近的^[25], 潮位的变化主要是由海水的辐散和辐合引起的。如图 4c 所示, 模式预测的潮位变化与放置在海底 CTD 观测到的海底压强变化十分吻合, 推测 Tpxo7.2 模式在观测点的潮汐预报是可信的, 说明了在潟湖区, 水深较浅(观测点水深为 69 m), 使用深度平均的方法计算正压潮流有局限性。

综上所述, 受观测限制, 在用深度平均方法计算正压潮时, 没有包含海表和海底的流速数据, 导致深度平均的全日正压潮仍然包含较多的全日内潮信号。导致全日分潮(O_1 、 K_1)的观测结果和模式结果有较大的相位差, 半日分潮 S_2 的观测结果的长短轴比模式结果的长短轴大一个量级。

3.2 正压潮与相干内潮的相位差

为了进一步厘清图 4a 和图 4b 中观测流速和模式流速的差异原因, 我们对全日正压潮与全日内潮的相位进行分析, 对内潮调和与分析获得全日相干内潮(O_1 、 K_1)的调和常数, 并与正压潮的进行对比。结果表明 O_1 、 K_1 分潮的潮流椭圆均沿顺时针方向旋转。图 5 表明, 从海表至海底, 全日内潮 O_1 流速的相位与全日正压潮 O_1 的相位差分别为 $205^\circ \sim 245^\circ$ 、 $190^\circ \sim 220^\circ$ 、 $165^\circ \sim 220^\circ$ 。同理计算 K_1 的相位差如图 6 所示, 分别为 $40^\circ \sim 120^\circ$ 、 $50^\circ \sim 155^\circ$ 、 $95^\circ \sim 200^\circ$ 。

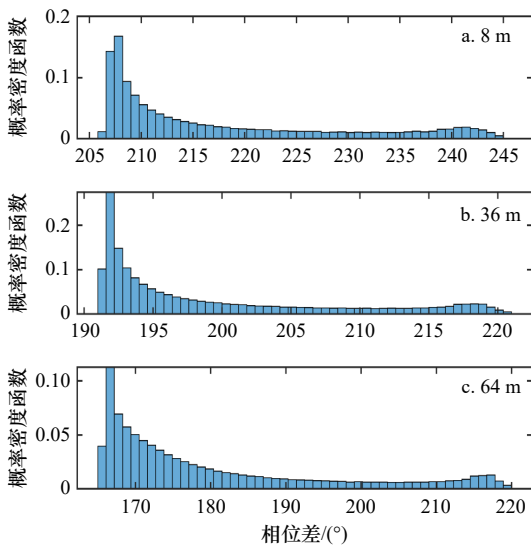


图 5 O_1 分潮相位差的概率密度函数分布
Fig. 5 Probability density function distribution of O_1 tidal phase difference

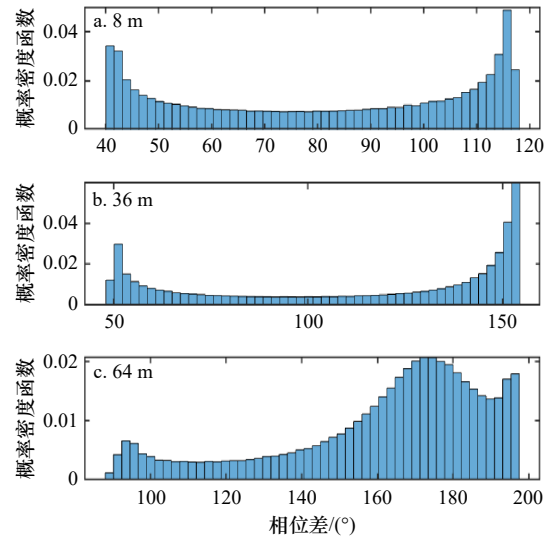


图 6 K_1 分潮相位差的概率密度函数分布
Fig. 6 Probability density function distribution of K_1 tidal phase difference

表 3 和表 4 分别展示了图 5 和图 6 中概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 分布图中峰值对应的相位差大小。对于 O_1 分潮, 不同深度的相位差都接近 180° , 说明正压潮与内潮的流向相反。推测在大潮(223 d)前后, 正压潮与内潮的流速相互抵消较大部分, 导致深度平均流的振幅较小; 在小潮(230 d)前后, 正压潮流与内潮流的抵消作用不显著, 导致深度平均流包含较多内潮信号, 振幅较大。

表 3 O_1 分潮概率密度函数峰值对应的相位差

Table 3 Phase difference corresponding probability density function peak of O_1 constituent

深度/m	相位差/ $^\circ$
8	207
36	191
64	167

表 4 K_1 分潮概率密度函数峰值对应的相位差

Table 4 Phase difference corresponding probability density function peak of K_1 constituent

深度/m	相位差/ $^\circ$
8	116
36	154
64	175

对于 K_1 分潮, 在 8 m 深度, 相位差为 116° , 正压潮流向与内潮流向接近垂直, 抵消作用不显著。在 36 m、64 m 深度, 相位差分别为 154° 、 175° , 因此与

O_1 分潮的过程类似,在大潮(223 d)前后抵消作用显著,小潮(230 d)前后抵消作用微弱。以上结果表明,观测海区的全日内潮与全日正压潮的流向不同,推测两者的强度相当。大潮期间(223 d 前后),全日内潮和全日正压潮流速相当,抵消作用强,使观测流速较小;小潮期间(230 d 前后),全日正压潮较弱,而全日内潮依然很强,使观测流速较大(图 4a, 图 4b)。

上述分析说明了图 3、图 4 中观测的深度平均的和模式预测的振幅、相位差异大的两个原因:(1)深度平均的全日正压潮中含有较多的内潮信号;(2)全日正压潮和全日内潮的相位差,使全日正压潮和全日内潮在大(小)潮前后发生强(弱)的抵消作用。

通常,内潮的最大值一般出现在天文大潮前后。潮龄表示大潮发生的时间与新月/满月的时间之差,前人在夏威夷海脊的研究表明,在源区附近内潮的潮龄变化范围可以达到 $-1\sim 9$ d^[26],说明了当地产生的内潮和当地的正压潮不一定是同相位的,可以存在一个相位差。西沙群岛复杂的岛屿地形,影响了内潮的传播路径和传播速度,使西沙群岛内潮龄的空间分布十分复杂。

潟湖区的表层流,受潮汐、表面波和风应力的共同驱动,流速通常较大。潟湖区的底层流受到内波的调制,流速和流向变化大。Davis 等^[27]在东沙环礁开展了海底的观测研究,揭示了内波能够增强底层的海流,甚至使其反向。同时带来了冷水,有助于珊瑚礁适应变暖事件^[28]。可见潟湖区海表与海底的流速分布,对于认识潟湖区内潮的整体结构特征非常重要,因此有必要在将来的工作中重点观测。

3.3 全日内潮的动能

通过前两小节分析可知,研究区域的全日内潮强度至少应与全日正压潮相当,才能抵消全日正压潮的流速,造成图 4 中的差异。本节分析了全日内潮动能在不同深度上的差异,以及其主要来源。对全日内潮进行调和与分析得到全日相干内潮,全日内潮减去相干部分得到全日非相干内潮。

如图 7 所示,全日相干内潮发生大潮的时间在深度上存在差异,50 m 以深,在 225 d、238 d 前后发生大潮,在 50 m 以浅,第一个大潮发生的时间逐渐延后,但第二个大潮仍在 238 d 前后发生。

如图 8 所示,对全日正压潮(diurnal barotropic tide, dbT)和全日内潮的动能进行一天的滑动平均处理后,发现全日相干内潮动能的最大值大于全日正压潮,说明潟湖区的全日内潮是强于正压潮的,在 223 d 前后,全日相干内潮和全日正压潮的动能几乎相等,但两者的流向不同,相互抵消使得观测流速较小,发生小潮,

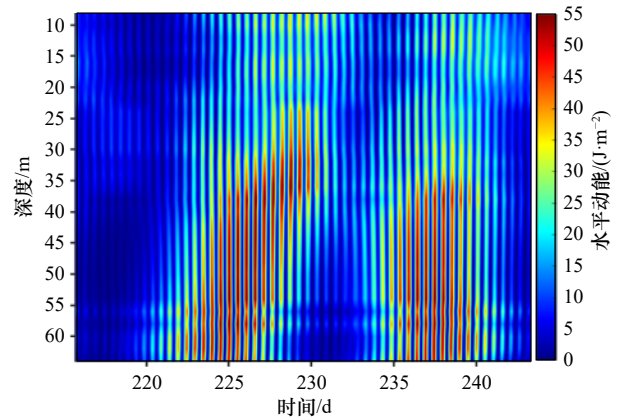


图 7 全日相干内潮水平动能的时间-深度剖面

Fig. 7 Horizontal kinetic energy of diurnal coherent internal tide

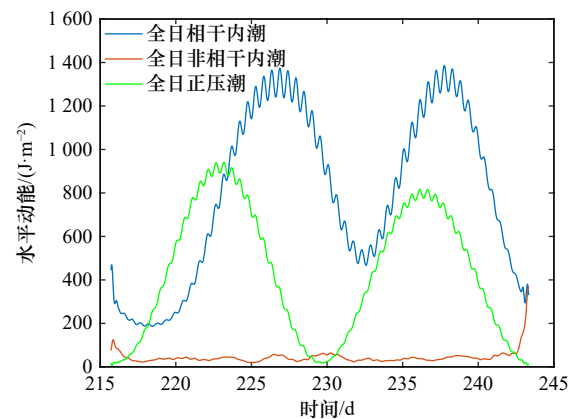


图 8 深度积分后全日相干/非相干内潮和 $T_{px0.7.2}$ 的全日正压潮的水平动能的时间序列

Fig. 8 Time series of depth-integrated of horizontal kinetic energy of diurnal coherent/incoherent internal tide and diurnal barotropic tide of $T_{px0.7.2}$

在 230 d 前后,全日正压潮较弱,两者几乎没有抵消,全日相干内潮的动能与 223 d 的全日正压潮动能相近,使观测流速较大,发生大潮。全日正压潮在 223 d 和 237 d 存在极大值,与大小潮周期吻合,而全日相干内潮(diurnal coherent internal tide, dcIT)的动能在 227 d、238 d 存在极大值,全日相干内潮出现大潮的时间滞后天文潮 1~3 d,大潮间隔的天数为 11 d,且小于大小潮(14 d)的调制周期,这是由于全日相干内潮的动能在不同深度上存在差异(图 7),而深度积分将不同深度的差异互相叠加导致的。全日非相干内潮(diurnal incoherent internal tide, dicIT)的动能在时间上则没有明显的规律。对时间和深度积分,得到全日相干内潮的动能占全日内潮总动能的 91%,远大于全日非相干内潮的动能。前人的研究发现,当内潮从吕宋海峡传播到南海北部陆坡、陆架区后,内潮的非相干性变得十分显著^[12-14],若潟湖区的内潮是由吕宋海峡等地传播而来,应呈现显著的非相干性。而图 8 表明潟

湖区内潮的相干性非常显著,图2的功率谱中在 O_1 、 K_1 分潮频率存在明显的谱峰,也佐证了潟湖区的全日内潮相干性高。前人研究发现,西沙群岛当地的正压潮与局地地形相互作用会产生大量的内潮^[7],因此潟湖区的全日内潮更有可能是在西沙群岛当地生成的,而从吕宋海峡、中沙群岛等地传播而来的可能性较小。

本文推测由于水深和地形的影响,西沙群岛当地产生的内潮的传播速度和路径发生了改变,使潟湖区内潮的潮龄大于天文潮的潮龄,两者流速能够部分抵消。

4 结论

本文基于分析南海西沙群岛潟湖区的浮标观测数据,研究了西沙群岛潟湖区的正压潮、内潮的基本特征,讨论了用深度平均方法分析海流的适用性,并探究了全日内潮的主要来源,得出以下结论:

(1)在潟湖区内,全日潮流起主导作用,其水平动能占整体海流动能的41%,半日潮流和近惯性流仅为6%、5%。全日正压潮流沿顺时针方向旋转,半日

正压潮流沿逆时针方向旋转。全日正压潮流受到地形的调制,涨落潮时主要为西北-东南向(沿等深线方向),半日正压潮流主要为东-西向。

(2)在潟湖区内,观测和模式的正压潮流其大-小潮周期存在半个相位差(6~7 d),造成该差异的主要原因是潟湖区全日内潮强于全日正压潮,两者的潮龄不同,大(小)潮期间强(弱)的抵消作用使得观测流速较小(大)。推测采用深度平均方法时,缺少近海表 and 海底的流速数据,使得观测的全日正压潮流中仍然包含全日内潮信号。

(3)在潟湖区内,内潮以全日潮为主,全日相干内潮动能占全日内潮总动能的91%,相干性十分显著。说明潟湖区的全日内潮主要是在西沙群岛当地生成的,而从吕宋海峡、中沙群岛等地传播而来的可能性很小。

致谢: 感谢中国科学院南海海洋研究所西沙海洋环境国家观测研究站的陈偿、黎大宁、龙振华等人在浮标布放和回收工作中的帮助。

参考文献:

- [1] Briscoe M G. Internal waves in the ocean[J]. *Reviews of Geophysics*, 1975, 13(3): 591-598.
- [2] Munk W, Wunsch C. Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1998, 45(12): 1977-2010.
- [3] Wang Yuhuai, Dai Changfeng, Chen Y Y. Physical and ecological processes of internal waves on an isolated reef ecosystem in the South China Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(18): L18609.
- [4] Osborne A R, Burch T L. Internal solitons in the Andaman Sea[J]. *Science*, 1980, 208(4443): 451-460.
- [5] Duda T F, Lynch J F, Irish J D, et al. Internal tide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the northern South China Sea[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(4): 1105-1130.
- [6] Simmons H, Chang M H, Chang Yating, et al. Modeling and prediction of internal waves in the South China Sea[J]. *Oceanography*, 2011, 24(4): 88-99.
- [7] Beardsley R C, Duda T F, Lynch J F, et al. Barotropic tide in the Northeast South China Sea[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(4): 1075-1086.
- [8] Alford M H, Peacock T, MacKinnon J A, et al. The formation and fate of internal waves in the South China Sea[J]. *Nature*, 2015, 521(7550): 65-69.
- [9] Zhao Ruixiang, Zhu Xiaohua, Park J H, et al. Internal tides in the northwestern South China Sea observed by pressure-recording inverted echo sounders[J]. *Progress in Oceanography*, 2018, 168: 112-122.
- [10] van Haren H. Incoherent internal tidal currents in the deep ocean[J]. *Ocean Dynamics*, 2004, 54(1): 66-76.
- [11] Kelly S M, Nash J D. Internal-tide generation and destruction by shoaling internal tides[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(23): L23611.
- [12] 王越, 黄晓冬, 杨运超, 等. 南海东北部全日非相干内潮的特征及其成因[J]. *中国海洋大学学报*, 2021, 51(5): 1-9.
Wang Yue, Huang Xiaodong, Yang Yunchao, et al. Characteristics and cause analysis of diurnal incoherent internal tides in the northeastern South China Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2021, 51(5): 1-9.
- [13] 翟荣伟, 陈桂英, 尚晓东. 南海北部相干内潮和非相干内潮演变特征[J]. *海洋学报*, 2017, 39(11): 24-36.
Zhai Rongwei, Chen Guiying, Shang Xiaodong. Evolution characteristics of coherent and incoherent internal tides in the northern South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(11): 24-36.
- [14] 梁辉, 郑洁, 田纪伟. 南海西北陆坡区内潮与近惯性内波观测研究[J]. *海洋学报*, 2016, 38(11): 32-42.
Liang Hui, Zheng Jie, Tian Jiwei. Observation of internal tides and near-inertial internal waves on the continental slope in the northwestern South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(11): 32-42.
- [15] Storlazzi C D, Cheriton O M, van Hooidonk R, et al. Internal tides can provide thermal refugia that will buffer some coral reefs from future global warming[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 13435.
- [16] Lee I H, Wang Yuhuai, Yang Y, et al. Temporal variability of internal tides in the Northeast South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C2): C02013.

- [17] Wu Ziku, Lu Xiangqing, Tian Jiwei. Simulation of barotropic and baroclinic tides in the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 24(2): 1–8.
- [18] 邓晓东, 刘军亮, 蔡树群. 南海西沙群岛陆架区的潮流特征分析[J]. *热带海洋学报*, 2013, 32(4): 8–12.
Deng Xiaodong, Liu Junliang, Cai Shuqun. Analyses of the tidal current characteristics on the continental shelf of the Xisha Islands in the South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2013, 32(4): 8–12.
- [19] Egbert G D, Erofeeva S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(2): 183–204.
- [20] Holloway P E, Chatwin P G, Craig P. Internal tide observations from the Australian north west shelf in summer 1995[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2001, 31(5): 1182–1199.
- [21] Kurapov A L, Egbert G D, Allen J S, et al. The M_2 internal tide off Oregon: inferences from data assimilation[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2003, 33(8): 1733–1757.
- [22] Martini K I, Alford M H, Kunze E, et al. Observations of internal tides on the Oregon continental slope[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2011, 41(9): 1772–1794.
- [23] Xu Zhenhua, Yin Baoshu, Hou Yijun, et al. Variability of internal tides and near-inertial waves on the continental slope of the northwestern South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(1): 197–211.
- [24] Codiga D L. Unified tidal analysis and prediction using the UTide Matlab functions[R]. Narragansett: University of Rhode Island, 2011.
- [25] van Haren H. Bottom-pressure observations of deep-sea internal hydrostatic and non-hydrostatic motions[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, 714: 591–611.
- [26] Holloway P E, Merrifield M A. On the spring-neap variability and age of the internal tide at the Hawaiian ridge[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(C4): 3126.
- [27] Davis K A, Arthur R S, Reid E C, et al. Fate of internal waves on a shallow shelf[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(5): e2019JC015377.
- [28] Lowe R J, Falter J L. Oceanic forcing of coral reefs[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2015, 7: 43–66.

Study on tidal characteristics of coral reef lagoon of Xisha Islands in the South China Sea based on mooring observation

Zhu Mingquan^{1,7}, Cen Xianrong⁴, Lu Yuanzheng^{1,2,3}, Guo Shuangxi^{1,2,3,7}, Qu Ling⁵, Huang Pengqi^{1,2,3},
Fang Wendong^{1,2,7}, Chen Ju^{1,2,6}, Zhou Shengqi^{1,2,3,7}

(1. State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China; 3. Institute of South China Sea Ecology and Environmental Engineering, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 4. School of Industrial Design and Ceramic Art, Foshan University, Foshan 528225, China; 5. Geophysical Exploration Brigade of Hubei Geological Bureau, Wuhan 430056, China; 6. Hainan Xisha Marine Environment National Observation and Research Station, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 7. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the 29-day full-depth mooring data of coral reef lagoon of Xisha Islands in South China Sea, we investigated the characteristics of the internal tides (ITs), the applicability of depth-averaging method for current analysis, and the source of ITs. The depth-averaged currents indicated that the diurnal tides were dominant, their HKE (horizontal kinetic energy) accounted for 41% of the total currents. The harmonic analyses of depth-averaged current and Tpxo7.2 model current indicated that the barotropic diurnal currents were modulated by topography, its main axis orientation was northwest-southeast. The spring-neap periods of barotropic diurnal currents with two methods have the half-phase shift (6–7 days). It is proposed that the depth-averaged barotropic diurnal currents contain the baroclinic diurnal components (diurnal internal tides) due to the lacking of measurements near the surface and bottom ocean. Further analysis showed that the barotropic and baroclinic diurnal currents had different amplitudes with the variable phase shift. The coherent diurnal ITs contributed 91% HKE to the total diurnal ITs, which implied that ITs was most generated in Xisha Islands.

Key words: coral reef lagoon; internal tide; coherent internal tide; barotropic tide