

利用多源高度计资料提取南海 低模态内潮能量*

马静怡^{1, 2, 3} 徐永生^{1, 3①}

(1. 中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2. 中国科学院大学 北京 100049;
3. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋动力过程与气候功能实验室 青岛 266237)

摘要 吕宋海峡由于剧烈变化的地形成为内潮产生的源地, 内潮是海洋混合的重要原因。为了认知南海的内潮能通量分布, 对南海的内潮有更好的理解, 本文利用 21 世纪以来发射的多颗高度计卫星: J2、J1T、GFO 以及 EN, 提取了吕宋海峡附近内潮的能通量。研究使用了调和分析和高通滤波等方法来提取第一模态内潮, 主要提取 K_1 , K_2 , M_2 , N_2 , O_1 , P_1 , Q_1 和 S_2 八个分潮。同时结合 WOA 数据对能通量进行计算。结果表明, 目标区域潮汐以全日分潮为主, 所选区域的全日分潮中 K_1 所占比例最大; 半日分潮中 M_2 分潮最强, 而内潮的能通量则是 M_2 分潮所占最大, 在吕宋海峡区域 M_2 能通量为 6.45GW。内潮主要产生在地形变化剧烈的地方, 海域的大部分区内潮能量很小。在吕宋海峡中部, 全日分潮能通量要小于南部地区, 而半日分潮则有较大值。

关键词 南海; 内潮; 能量; 高度计

中图分类号 P731.2 doi: 10.11693/hyhz20180100004

内潮具有和潮汐相同的频率, 在密度稳定层化的海洋中, 正压潮流与变化的地形相互作用诱发产生内潮。在内潮产生过程中, 正压潮和内潮相互作用, 部分正压潮能量转化为内潮能量从而减弱正压潮, 从而产生能量的转移和海水混合(Egbert *et al.*, 2000)。大约有 1TW 的海面潮汐能量在深海地形粗糙(如海山, 海脊、海沟等)的地方耗散(Egbert *et al.*, 2003)。潮汐能量的主要部分转换成了低模态的内潮(Laurent *et al.*, 2002; Carter *et al.*, 2008), 并且从源地开始可以传播很长的距离(Dushaw *et al.*, 1995; Ray *et al.*, 1996)。

风力和内潮驱动了大尺度的经向翻转环流(MOC), 这对于研究全球气候变化有重要意义(Munk *et al.*, 1998)。虽然整个海洋能量混合的量级和程度对

研究 MOC 很重要, 但是海洋混合地点的分布也同样重要(Simmons *et al.*, 2004)。因此, 了解内潮的产生、传播、分布以及变化就显得十分重要(Gregg *et al.*, 2003)。除此之外, 内潮在生物地球化学上也有重要意义: Jan 等(2009)研究了台湾陆架南部的生物地球化学环境受到产生自吕宋海峡的内潮的影响。同时, 内潮还会对垂向营养物质的输送(Sharples *et al.*, 2007)以及水下声波的传播等有重要影响。

Ray 等(1996, 1997)第一次指出: 内潮会对海表面高度(SSH)造成大概几厘米的位移, 可以被高度计探测到, 并且使用了高通滤波的方法分离正压潮和斜压潮; Ray 等(2001)假设两个传播方向相反的内潮信号叠加, 利用高度计资料拟合了内潮信号, 提供了从高度计资料提取内潮的方法, 并计算了太平洋中

*国家重点研发计划专项项目, 2016YFC1401004 号; 青岛海洋科学与技术试点国家实验室项目, 2018ASKJ01 号; 国家自然科学基金面上项目, 41676168 号, 41376028 号; 国家自然科学基金创新研究群体项目, 41421005 号; 基金委-山东省联合基金项目, U1406401 号; 山东省自主创新重大关键技术科技创新工程项目, 2014GJJS0101 号。马静怡, 硕士研究生, E-mail: majingyi15@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 徐永生, 博士生导师, 教授, E-mail: yongsheng.xu@qdio.ac.cn

收稿日期: 2018-01-08, 收修改稿日期: 2018-04-26

部的能量通量; Tian 等(2003, 2006)使用 T/P 资料通过傅立叶分析以及频率波数方法计算内潮的速度和能通量; Zhao 等(2011)采用了多颗高度计卫星的数据, 计算了夏威夷附近的内潮, 发展了二维的平面波拟合方法; Zhao(2016)又使用了新的高度计卫星 CryoSat-2 对内潮进行计算。张效谦等(2005b)基于内波动力学方程, 提出了利用 TOPEX/Poseidon(T/P)高度计提取内潮的方法, 并给出了整个太平洋 M_2 内潮能通量的分布。

许多研究者利用观测和数值模拟的手段对南海的潮汐开展工作。方国洪等(1994)利用二维球坐标数值模式, 研究了南海 M_1 和 M_2 分潮的潮汐、潮流和能通量分布; 王延强等(2014)通过 TOPEX/Poseidon 系列高度计 18.6 年的数据, 给出了南海四个主要分潮的同潮图。对于南海内潮的研究, 张效谦等(2005a)发现, 南海北部正压潮和内潮都以 M_2 , K_1 , O_1 , P_1 分潮为主; 杨庆轩(2008)研究吕宋海峡的水通量及内潮能通量发现, 吕宋海峡是内潮高发区, 并且大量的内潮能通量向南海传播, 并指出对于半日潮, 第一模态含能量约为 6.5 kW/m ; 李欢等(2011)使用 HAMSOM 模式研究了吕宋海峡 M_2 内潮的生成与传播过程, 表明西传的内潮能量分为 2 支进入南海, 在 122°E 以东, 能量主要呈束状沿东南方向传入太平洋。

然而, 对于第一模态内潮, 大部分研究集中在单一潮汐成份(如 M_2), 或者单一高度计卫星。进入二十一世纪以来, 多颗高度计卫星(Jason 系列卫星、HY-2、SARAL、ENVISAT 等)相继发射, 对地面的覆盖大大提高, 同时高度计的精度也不断提高。由于吕宋海峡附近剧烈变化的地形, 南海的内潮频繁生成, 而利用高度计对我国南海地区进行内潮能量研究尚不多见, 本文针对主要的八个分潮(K_1 , K_2 , M_2 , N_2 , O_1 , P_1 , Q_1 , S_2)计算南海的第一模态内潮能量。

1 数据

1.1 卫星数据

1.1.1 数据来源 本文使用了由 Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data(AVISO)提供的 CorSSH 沿轨数据, 数据经过了沿轨道的校正。使用高度计数据的缺点之一就是单颗卫星的地面轨迹覆盖率较小, 而自 TOPEX/Poseidon 卫星发射以来, 各国相继发射了多颗高度计卫星, 这就使得对地面的覆盖率大大提高, 如图 1 所示。

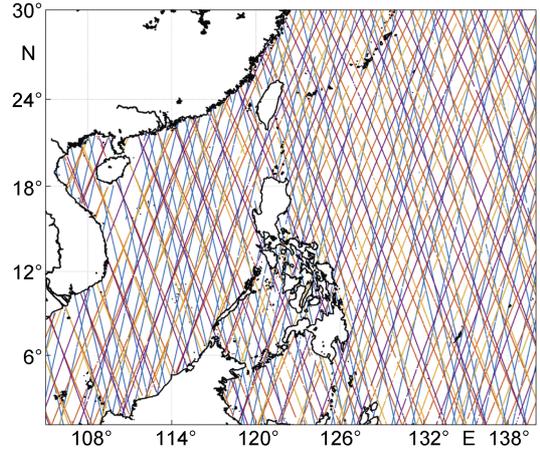


图 1 所选卫星轨道地面分布

Fig.1 The distribution of selected satellite ground tracks
注: 蓝线表示 ENVISAT(EN), 红线表示 Geosat Follow-On(GFO), 黄线表示 Jason-2(J2), 紫线表示 Jason-1 Tandem(J1T), J1T 为 Jason1 卫星变轨后的轨道, 位于原轨道之间

1.1.2 混淆周期 对潮汐来说, 由于高度计的采样周期长, 会产生高频混淆。对于给定的采样间隔, 当采样间隔过大时, 会导致原时间序列中频率高于折叠频率:

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t} \quad (1)$$

原时序中 $f > f_N$ 部分的能量在采样后被叠加到 $0-f_N$ 上, 高频混淆发生在(李立等, 1999):

$$(2f_N) \pm f, (4f_N) \pm f, \dots, (2nf_N) \pm f, n=1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

其中, f 表示各主要分潮的频率。依据混淆频率可以计算在某个采样时间间隔下的混淆周期。此外, 由 Rayleigh 准则, 分辨两个不同频率的振动所需时间长度, 也即高度计资料的长度 T_R 为:

$$T_R \geq \frac{1}{f_i - f_j} \quad (3)$$

其中, f_i 和 f_j 表示两个分潮的混淆频率, 由此计算出各个高度计分辨八大分潮所需要的最短时间长度, 如表 1—4 所示。

表 1 采样时间为 9.9156 天时所需资料长度
Tab.1 The necessary length of data when sampling time is 9.9156 day

分潮	混淆周期(天)	K_2 (年)	M_2 (年)	N_2 (年)	O_1 (年)	P_1 (年)	Q_1 (年)	S_2 (年)
K_1	172.949	0.47	0.27	0.19	0.17	0.50	0.32	0.24
K_2	86.475	-	0.61	0.32	0.27	8.94	0.96	0.50
M_2	62.167	-	-	0.66	0.47	0.57	1.65	2.87
N_2	49.490	-	-	-	1.65	0.31	0.47	0.87
O_1	45.728	-	-	-	-	0.26	0.37	0.57
P_1	88.830	-	-	-	-	-	0.87	0.47
Q_1	69.332	-	-	-	-	-	-	1.05
S_2	58.685	-	-	-	-	-	-	-

表 2 采样时间为 17.0505 天时所需资料长度
Tab.2 The necessary length of data when sampling time is 17.0505 day

分潮	混淆周期 (天)	K ₂ (年)	M ₂ (年)	N ₂ (年)	O ₁ (年)	P ₁ (年)	Q ₁ (年)	S ₂ (年)
K ₁	175.447	0.48	1.08	0.20	0.87	0.50	0.35	12.24
K ₂	87.723	-	0.33	0.35	1.08	0.25	1.30	0.50
M ₂	317.111	-	-	0.17	0.48	0.94	0.26	0.99
N ₂	52.072	-	-	-	0.26	0.14	0.48	0.21
O ₁	112.964	-	-	-	-	0.32	0.59	0.94
P ₁	4458.228	-	-	-	-	-	0.21	0.48
Q ₁	74.046	-	-	-	-	-	-	0.36
S ₂	168.817	-	-	-	-	-	-	-

表 3 采样时间为 35 天时所需资料长度
Tab.3 The necessary length of data when sampling time is 35 day

分潮	混淆周期 (天)	K ₂ (年)	M ₂ (年)	N ₂ (年)	O ₁ (年)	P ₁ (年)	Q ₁ (年)	S ₂ (年)
K ₁	365.239	1.00	0.35	0.37	0.26	5992.45	0.57	-
K ₂	182.617	-	0.54	0.57	0.35	1.00	1.33	-
M ₂	94.487	-	-	8.68	1.00	0.35	0.90	-
N ₂	97.393	-	-	-	0.90	0.37	1.00	-
O ₁	75.071	-	-	-	-	0.26	0.47	-
P ₁	365.300	-	-	-	-	-	0.57	-
Q ₁	132.794	-	-	-	-	-	-	-
S ₂	Inf	-	-	-	-	-	-	-

注: Inf 表示无穷

表 4 采样时间为 30 天时所需资料长度
Tab.4 The necessary length of data when sampling time is 30 day

分潮	混淆周期 (天)	K ₂ (年)	M ₂ (年)	N ₂ (年)	O ₁ (年)	P ₁ (年)	Q ₁ (年)	S ₂ (年)
K ₁	365.239	1.00	1.63	2.14	2.59	6092.30	0.68	-
K ₂	182.617	-	0.62	1.88	1.63	1.00	2.14	-
M ₂	943.676	-	-	0.93	1.00	1.63	0.48	-
N ₂	248.802	-	-	-	12.32	2.14	1.00	-
O ₁	263.376	-	-	-	-	2.59	0.93	-
P ₁	365.299	-	-	-	-	-	0.68	-
Q ₁	148.033	-	-	-	-	-	-	-
S ₂	Inf	-	-	-	-	-	-	-

根据表 1—4 所计算的最小分辨时间, 本文选取了四颗高度计卫星: EN、JIT、J2 和 G2, 并且选取了这些卫星在轨期间的全部数据。本文选取的目标区域为 1°N—30°N, 105°E—140°E, 范围包括了吕宋海峡、南海及部分西太平洋地区。

1.2 WOA 数据

在计算内潮能量时需要高度计数据与水文数据相

结合, 本文使用了 NOAA 提供的 World Ocean Atlas (WOA)2013 年第二版密度数据, 并选用了其中的 Objectively Analyzed Climatologies 数据, 数据分辨率为 0.25°×0.25°, 在垂直方向上不均匀的分成了 101 层。

2 内潮分离

2.1 调和分析

首先, 按照 1 中的条件对数据进行筛选, 并对卫星数据进行校正, 包括电磁偏差校正、干湿对流校正、电离层校正等。之后对选取的数据进行网格化处理, 每隔 0.25°对数据进行划分, 将网格内的数据进行平均, 这与 WOA 数据的分布相匹配。综合多颗高度计卫星, 在每个网格上分别对每个分潮作调和分析:

$$\eta(t) = a \cos(\omega_0 t - \phi) \quad (4)$$

其中, a 是潮汐的振幅, ϕ 表示相位, ω_0 表示潮汐频率, 调和分析通过最小二乘的方法将各个分潮分离。八大分潮经过初步的调和分析后, 全日分潮和半日分潮的同潮图如图 2、图 3 所示。

如图 2 所示, 在所选择的全日分潮中, 由等振幅线可知, K₁ 分潮所占比例最大, 其次是 O₁ 分潮。所有的全日分潮振幅在整个南海区域相差不大, 且变化平稳。而在靠近陆架以及岛屿的区域, 潮波系统相对复杂, 等振幅线与同潮时线密集。类似的如图 3 所示, 在四个半日分潮中, M₂ 分潮的振幅最大, 占据主要位置, 其次是 S₂ 分潮。南海大部分海域的等振幅线非常稀疏, 同潮时线相对稀疏。这是由于南海四周存在大陆和岛屿, 潮波经过边界的反射后容易形成驻波, 所以南海的大部分海域以驻波为主。全日分潮和半日分潮的同潮时线在南海中央稀疏, 表明该处是波腹的所在地(孙湘平, 2006)。

吕宋海峡是南海与西太平洋进行水体交换的主要通道, 在图 3 中可以明显看出吕宋海峡东西两侧不同的潮波系统。自吕宋海峡进入南海以后, 同潮时线变得更加密集, 而等振幅线则在水深处变得稀疏。对比图 2 和图 3 发现, 南海区域的半日分潮同潮时线比全日分潮同潮时线更加密集, 而就振幅大小来说, 南海的全日分潮要强于半日分潮。

根据调和分析得出的振幅实际上包含了正压潮部分和斜压潮部分, 由于斜压潮是在潮汐的驱动下产生的, 所以正压潮和斜压潮的频率一致, 斜压潮即内潮。要获得各个分潮内潮能量, 就必须剔除正压潮部分。

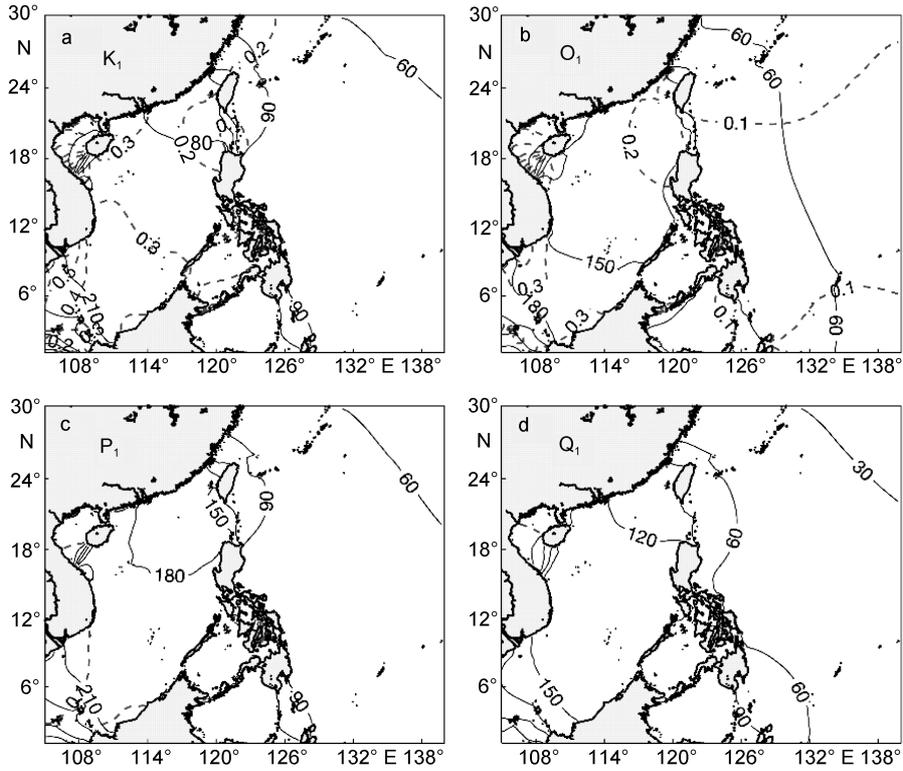


图 2 全日分潮同潮图

Fig.2 The cotidal charts of diurnal tides
注: 虚线表示等振幅线(单位: m), 实线表示同潮时线

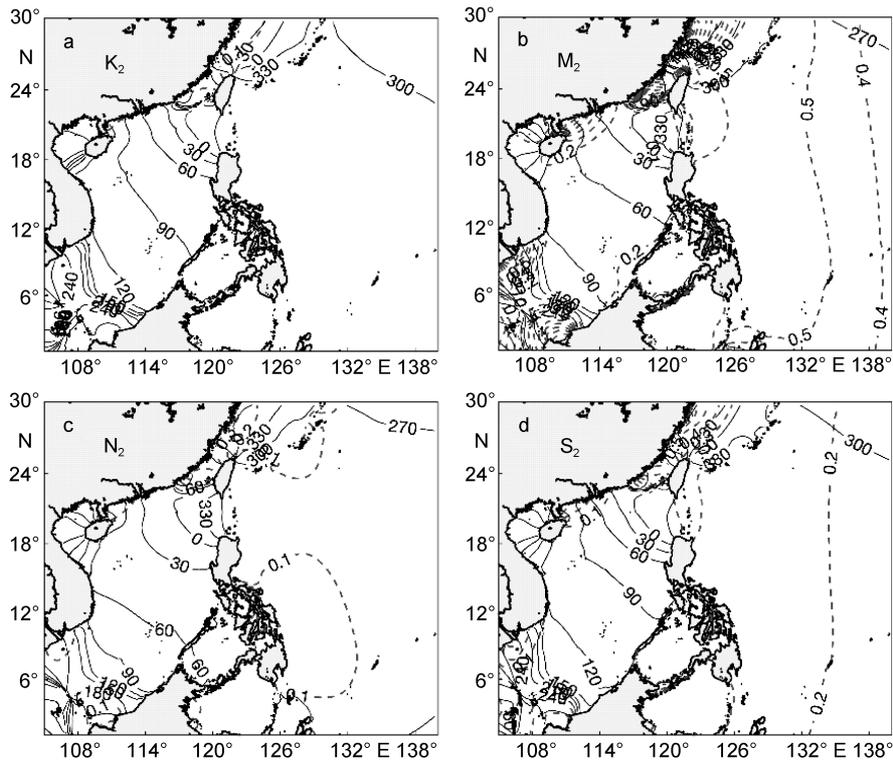


图 3 半日分潮振幅同潮图

Fig.3 The cotidal charts of semidiurnal tides
注: 其中虚线表示等振幅线(单位: m), 实线表示同潮时线

2.2 滤波

Ray 等(2001, 2011)提供了一种分离内潮和正压潮的方法: 空间高通滤波。正压潮的波长在几千公里, 而内潮的波长则远远小于这个量级, 即使是最大的内潮第一模态, 内潮波长也仅仅在百公里左右。按照 Ray 等(2011)以及 Zhao 等(2012)所研究的滤波, 本文选取了 400km 作为界限进行空间高通滤波, 同时对于滤波的方向做了一定的选择。根据 Zhao(2014)对南海的内潮传播方向的研究, 本文以 121°E 为界, 对吕宋海峡两侧的内潮沿不同方向进行滤波, 如图 4 所示:

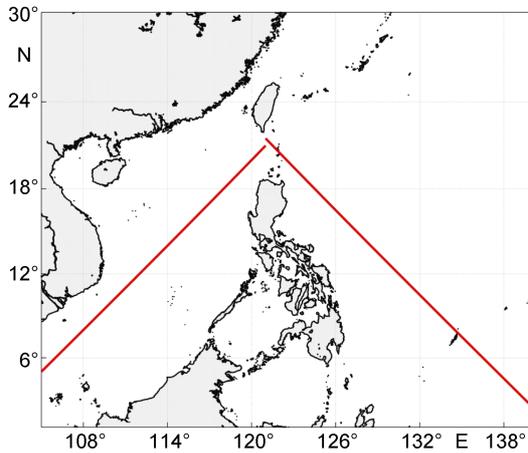


图 4 滤波方向

Fig.4 The directions of filtering

如图 4 所示, 在吕宋海峡西侧沿东北-西南方向进行滤波, 而在吕宋海峡东侧沿西北-东南方向进行滤波, 这是因为滤波在沿着内潮传播的方向上进行, 可以较好地滤掉正压潮的影响。同时, 在结果中对水深进行控制, 略去水深小于 30m 的位置。这样经过滤波之后的数据包含了内潮的信息, 用这些信息对内潮进行能量计算。

3 能量计算

3.1 临界纬度计算

内潮的频率必须大于当地的近惯性频率, 即: 潮汐频率 ω 和惯性频率 f 相等的纬度即为临界纬度 (Dushaw, 2006; Zhao *et al*, 2012), 因此:

$$\text{turning latitude} = \arcsin\left(\frac{\omega}{2\Omega}\right) \quad (5)$$

其中, ω 表示潮汐频率, Ω 表示地球自转角速度。经过(5)式计算各个分潮的临界纬度如表 5 所示:

表 5 各分潮临界纬度
Tab.5 The turning latitudes of different tides

K ₁	K ₂	M ₂	N ₂	O ₁	P ₁	Q ₁	S ₂
30.0	89.9	74.5	71.0	27.6	29.8	26.4	85.8

可以看出 K₂、M₂、N₂、S₂ 的临界纬度和本文所选区域的最大纬度(30°N)相差很大, 而 K₁、O₁、P₁、Q₁ 分潮的临界纬度集中在 30°N 附近, 对整个所选海域的计算结果影响不大。

3.2 能量计算

假设 $\Phi(z)$ 描述垂向位移和垂向速度的垂向结构, $\Pi(z)$ 描述斜压压力和水平速度的垂向结构, 模态 $\Phi(z)$ 可以被特征值方程表示 (Pedlosky, 2003):

$$\frac{d^2\Phi(z)}{dz^2} + \frac{N^2(z)}{c^2}\Phi(z) = 0 \quad (6)$$

且满足边界条件:

$$\begin{cases} \Phi(0) = 0 \\ \Phi(-H) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, H 表示水深, $N(z)$ 指浮力频率, c 是特征速度, 此外, $\Pi(z)$ 和 $\Phi(z)$ 还满足:

$$\Pi(z) = \rho_0 c^2 \frac{d\Phi(z)}{dz} \quad (8)$$

$$\Phi(z) = -\frac{1}{N^2(z)\rho_0} \frac{d\Pi(z)}{dz} \quad (9)$$

其中, ρ_0 是海水密度 1028kg/m³, 特征速度 c 是在非旋转流体下的相速度, 而在地球旋转的影响下, 频散关系可以表示为:

$$\omega^2 = k^2 c^2 + f^2 \quad (10)$$

其中, ω 表示潮汐频率, f 是惯性频率, k 是波数。利用 WOA 数据可以计算出海水的浮力频率 $N(z)$:

$$N(z) = \left[-\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho(z)}{dz} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

如图所示为所选区域内一点(17.5°N, 18.75°S)的第一模态的浮力频率 $N(z)$ 与 $\Phi(z)$:

各个分潮第一模态的压力 $p(z)$, 水平速度 $u(z)$, $v(z)$, 垂向位移 $\eta(z)$ 可以用海表面振幅 a , 第一模态垂向结构 $\Phi(z)$ 和 $\Pi(z)$ 表示出来 (Chiswell, 2006; Zhao *et al*, 2009):

$$p(z) = a\rho_0 g \Pi_1(z) \quad (12)$$

$$u(z) = a \frac{g\omega k_1}{\omega^2 - f^2} \Pi_1(z) \quad (13)$$

$$v(z) = -a \frac{igfk_1}{\omega^2 - f^2} \Pi_1(z) \quad (14)$$

$$\eta(z) = -a\rho_0 g \Phi_1(z) \quad (15)$$

某点第一模态的垂向能量积分可以通过下式计算:

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} \int_{-H}^0 u(z)p(z) \\ &= \frac{1}{2} a^2 \left[\frac{\rho_0 g^2 \omega k_1}{\omega^2 - f^2} \int_{-H}^0 \Pi_1^2(z) dz \right] \\ &= \frac{1}{2} a^2 F_n \end{aligned} \quad (16)$$

其中, F_n 仅仅是水深 H 、潮汐频率 ω 、浮力频率 N 和惯性频率 f 的函数, 再加上 2.2 中求得的内潮引起的

海面振幅 a , 可以获得第一模态各个内潮分潮在海表面的能通量分布:

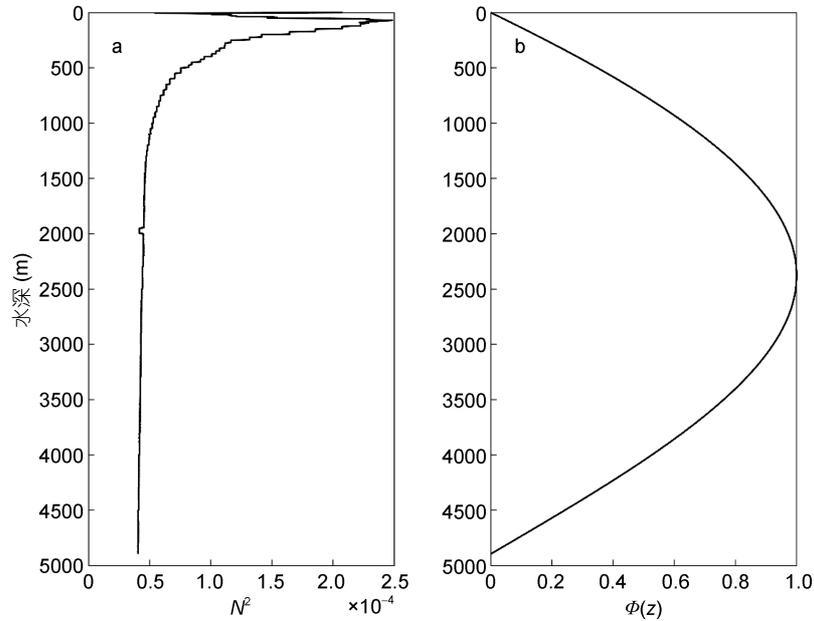


图 5 $N(z)$ 与 $\Phi(z)$ 随水深变化
Fig.5 The changes of $N(z)$ and $\Phi(z)$ with depth

从图 6 来看, 所选区域内, 全日分潮中 K_1 、 O_1 分潮占据绝对优势的位置, 其次是 P_1 分潮, Q_1 分潮所贡献的能量最小。源自吕宋海峡的 K_1 分潮内潮能量

大于同位置的 O_1 分潮。类似的, 在图 7 中可以看到, 半日分潮中 M_2 分潮的能量最高, S_2 分潮次之, 然后是 N_2 分潮, 最小的是 K_2 分潮。

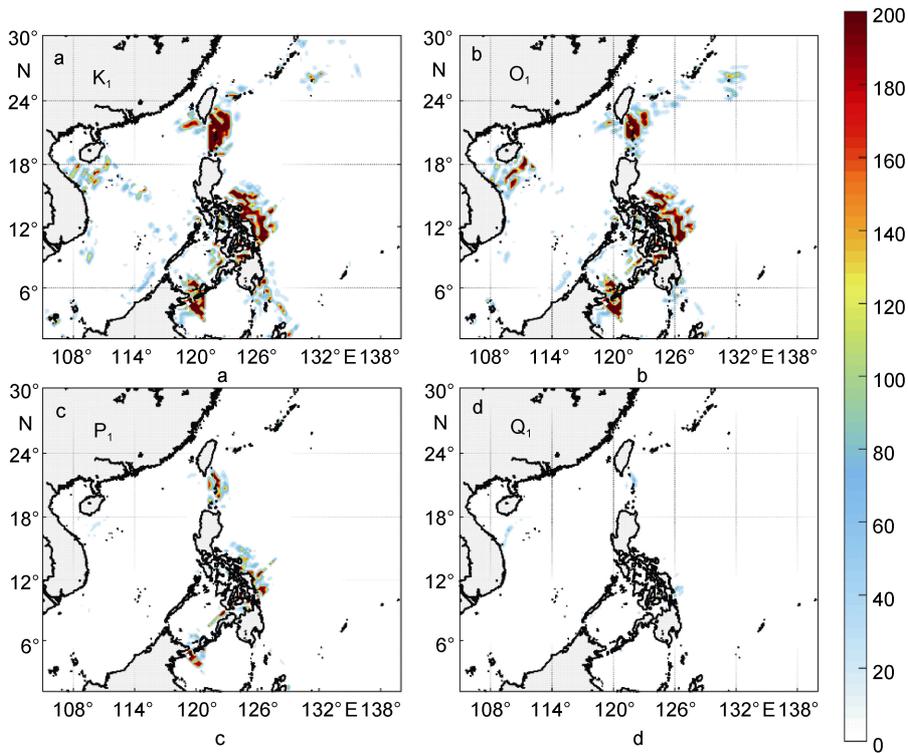


图 6 全日内潮能通量分布(单位: kW/m)
Fig.6 The distribution of energy flux of diurnal tides (unit: kW/m)

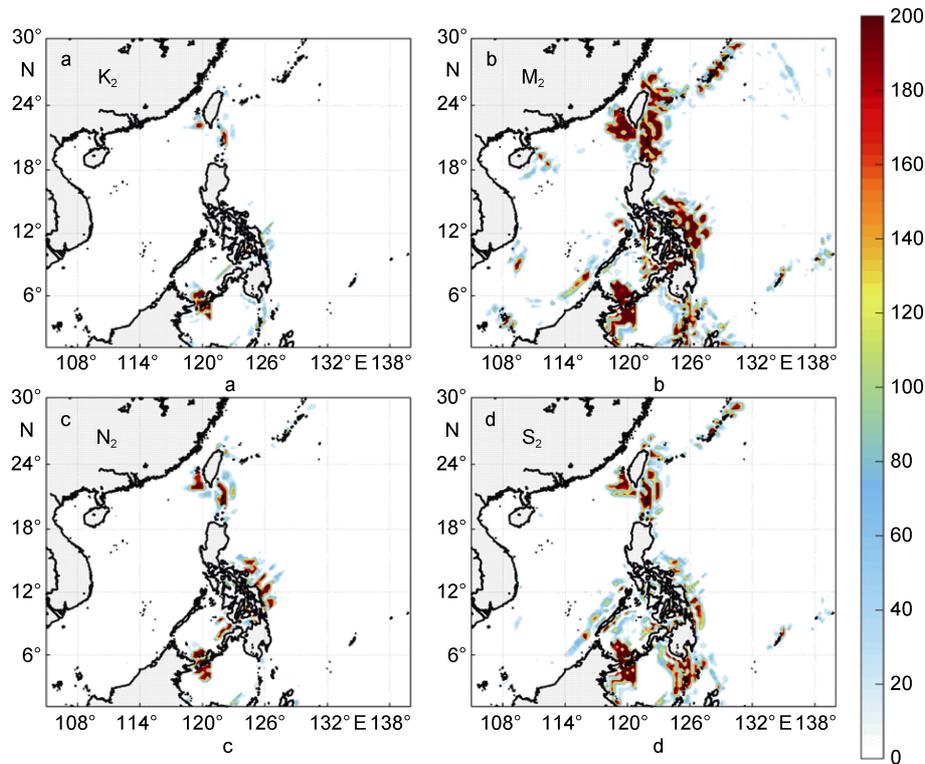


图 7 半日内潮能通量分布(单位: kW/m)

Fig.7 The distribution of energy flux of semidiurnal tides (unit: kW/m)

就整个海域来说, 不论是全日分潮还是半日分潮, 内潮能量的高值区自北向南主要有以下几个: 琉球群岛附近、吕宋海峡周围、菲律宾萨马岛以东海域、南沙群岛以及苏禄群岛两侧。其中在南海内部还存在相对较小的能量聚集区: 西沙群岛和中沙群岛, 这可以从 K_1 、 O_1 和 M_2 分潮能量的分布得知。这是由于这些地方地形变化复杂, 潮地相互作用从而产生丰富的内潮。如: 西沙群岛由 30 多个岛、礁、滩等组成, 而南沙群岛是南海诸岛中分布最广泛, 礁、滩最多的群岛, 共有岛、礁、滩等 230 余座(孙湘平, 2006)。此外, 在远离内潮生成地之后, 内潮的能量迅速衰减, 所以在图上呈现区块状分布。

4 讨论

在所选择的八大分潮中, M_2 、 S_2 和 K_1 、 O_1 分潮内潮能量最大, 量值集中在 7—14kW/m, 其次是 N_2 、 P_1 和 K_2 分潮, 能通量大小在 2—4kW/m 之间, 最小的是 Q_1 分潮, 内潮能通量仅为 0.717kW/m。根据 Zhao 等(2014)对于三个分潮能量的计算, M_2 分潮最大, 其次是 K_1 分潮和 O_1 分潮。由图 6 和图 7, 许多地区的内潮能通量极小, 特别是在海盆内部远离内潮生成

地的地方, 而在地形变化比较复杂的海峡、岛屿等地, 内潮能通量较大。此外, 能通量高的区域相对集中在一起, 红色区域向外迅速衰减成蓝色, 这表明, 内潮能量高的地方聚集在一起。根据 Zhao(2014)提供的内潮传播的规律, 沿传播轴线两侧区域内潮能通量总是高于其他区域, 且随着传播距离的增加, 能通量的值逐渐变小。在远离轴线的岛屿地区, 总会产生新的能量高值点。

为了与前人的结果进行比较, 本文对吕宋海峡地区 M_2 分潮的能通量进行了计算, M_2 分潮内潮的能通量大小约为 6.45GW; Niwa 等(2004)的模式计算结果为 7.4GW; Jan 等(2008)给出的模拟结果为 5.3GW, 本文的结果与之符合较好。对于全日分潮, 大约有 5kW/m 和 20kW/m 的全日分潮能通量分别在吕宋海峡中部和吕宋海峡南部地区被探测到, 而对应的半日分潮能通量大小分别约为 20kW/m 和 10kW/m (Alford *et al*, 2015), 本文也对这两个区域进行了逐点验证, 与其结果基本相符。对比最大的 K_1 全日分潮和 M_2 半日分潮, M_2 分潮在吕宋海峡中部区域的确存在较大值区, 而全日分潮的较大值区域则没有出现在该区域。在吕宋海峡南部, M_2 分潮能通量值明显小

于吕宋海峡中部。此外,陈默等(2018)利用 MITgcm 模式给出了南海部分海域能通量的分布,主要集中在吕宋海峡,西沙群岛以及南沙群岛地区,其分布以及量值与本文结果相符。

观察图 6 及图 7 发现,在菲律宾东侧存在内潮能量大值区,且不论是全日分潮还是半日分潮,内潮的分布十分相似,呈放射状向外发散,并且沿西北至东南方向交替出现内潮能量的大小变化。同样,苏禄群岛两侧的内潮能量分布也十分相似,沿着垂直于苏禄群岛的方向向南北两侧发散。

5 总结

本文利用了 J2、J1T、GFO 以及 EN 四颗卫星在轨期间的数据,并结合 WOA 气候态数据,首次对南海以及西太平洋部分地区的主要八个分潮的内潮能通量进行了计算,还对各个采样时间的高度计对不同分潮的混淆时间进行了计算。在计算过程中利用了经典的调和分析方法并选取合适的窗口来提取内潮,最后根据内潮反映在海表面的振幅,对内潮的能量进行了计算。

由结果可知,在所选区域内,全日分潮的潮汐振幅比半日分潮要大,说明该区域的潮汐类型以全日分潮为主,而就内潮的能量来说, M_2 和 S_2 分潮能量占比最大,全日分潮中 K_1 分潮能量最大,其次是 O_1 分潮;在半日分潮中, M_2 分潮的能通量最大,甚至超过了一些全日分潮,在吕宋海峡区域 M_2 分潮内潮的能通量大小约为 6.45GW。大值区主要集中在地形变化相对剧烈的区域,能量高的地方总是聚集在一起,向非传播方向迅速衰减。对于全日分潮,能通量的最大值出现在吕宋海峡南部区域,而在吕宋海峡中部区域的能通量较小;对于半日分潮,位于吕宋海峡中部的区域则有较大的能通量,而南部区域能通量相对较小。

Ray 等(2016)同样用高度计对内潮进行了提取,结果显示,在南海地区有较强的季节性变化,夏季振幅和冬季振幅存在明显差异,同时,本文在滤波时直接选取了 400km,今后对于滤波波长的窗口选取还需仔细研究。因此,将海区的季节性变化考虑在内以及滤波窗口的大小将是下一步要进行的工作。

参 考 文 献

王延强,仇天宇,朱学明,2014. 基于 18.6 年卫星高度计资料对南海潮汐的分析与研究. 海洋预报, 31(2): 35—40

- 方国洪,曹德明,黄企洲,1994. 南海潮汐潮流的数值模拟. 海洋学报, 16(4): 1—12
- 孙湘平,2006. 中国近海区域海洋. 北京: 海洋出版社, 22—23
- 李立,吴日升,李燕初等,1999. TOPEX/POSEIDON 高度计浅海潮汐混淆的初步分析. 海洋学报, 21(3): 7—14
- 李欢,陈学恩,宋丹,2011. 吕宋海峡 M_2 内潮生成与传播数值模拟研究. 中国海洋大学学报, 41(1/2): 16—24
- 杨庆轩,2008. 吕宋海峡通量及南海混合研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 68
- 张效谦,梁鑫峰,田纪伟,2005a. 南海北部 450 m 以浅水层内潮和近惯性运动研究. 科学通报, 50(18): 2027—2031
- 张效谦,梁鑫峰,周磊,2005b. 利用 TOPEX/Poseidon 高度计资料提取的太平洋 M_2 内潮能通量分布. 海洋学报, 27(5): 9—14
- 陈默,陈学恩,张洪欣等,2018. 全南海内潮生成与传播的数值模拟研究. 中国海洋大学学报, 48(2): 1—10
- Alford M H, Peacock T, MacKinnon J A *et al*, 2015. The formation and fate of internal waves in the South China Sea. *Nature*, 521 (7550): 65—69, <https://www.nature.com/articles/nature14399>
- Carter G S, Merrifield M A, Becker J M *et al*, 2008. Energetics of M_2 barotropic-to-baroclinic tidal conversion at the Hawaiian Islands. *Journal of Physical Oceanography*, 38(10): 2205—2223
- Chiswell S M, 2006. Altimeter and current meter observations of internal tides: do they agree? *Journal of Physical Oceanography*, 36(9): 1860—1872
- Dushaw B D, 2006. Mode-1 internal tides in the western North Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 53(3): 449—473
- Dushaw B D, Howe B M, Cornuelle B D *et al*, 1995. Barotropic and baroclinic tides in the central North Pacific Ocean determined from long-range reciprocal acoustic transmissions. *Journal of Physical Oceanography*, 25(4): 631—647
- Egbert G D, Ray R D, 2000. Significant dissipation of tidal energy in the deep ocean inferred from satellite altimeter data. *Nature*, 405(6788): 775—778
- Egbert G D, Ray R D, 2003. Semi-diurnal and diurnal tidal dissipation from TOPEX/Poseidon altimetry. *Geophysical Research Letters*, 30(17): 1907, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2003GL017676/full>
- Gregg M C, Sanford T B, Winkel D P, 2003. Reduced mixing from the breaking of internal waves in equatorial waters. *Nature*, 422(6931): 513—515
- Jan S, Chen C T A, 2009. Potential biogeochemical effects from vigorous internal tides generated in Luzon Strait: a case study at the southernmost coast of Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C4): C04021
- Jan S, Lien R C, Ting C H, 2008. Numerical study of baroclinic tides in Luzon Strait. *Journal of Oceanography*, 64(5): 789
- Laurent L S, Garrett C, 2002. The role of internal tides in mixing the deep ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 32(10): 2882—2899
- Munk W, Wunsch C, 1998. Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic*

- Research Papers, 45(12): 1977—2010
- Niwa Y, Hibiya T, 2004. Three-dimensional numerical simulation of M_2 internal tides in the East China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C4): C04027
- Pedlosky J, 2003. Rotation and potential vorticity. In: Pedlosky J ed. *Waves in the Ocean and Atmosphere*. Berlin: Springer, 107—117
- Ray R D, Cartwright D E, 2001. Estimates of internal tide energy fluxes from Topex/Poseidon altimetry: central north pacific. *Geophysical Research Letters*, 28(7): 1259—1262
- Ray R D, Mitchum G T, 1996. Surface manifestation of internal tides generated near Hawaii. *Geophysical Research Letters*, 23(16): 2101—2104, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/96GL02050/abstract>
- Ray R D, Mitchum G T, 1997. Surface manifestation of internal tides in the deep ocean: observations from altimetry and island gauges. *Progress in Oceanography*, 40(1—4): 135—162
- Ray R D, Zaron E D, 2011. Non-stationary internal tides observed with satellite altimetry. *Geophysical Research Letters*, 38(17): L17609, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011GL048617/full?isReportingDone=true>
- Ray R D, Zaron E D, 2016. M_2 internal tides and their observed wavenumber spectra from satellite altimetry. *Journal of Physical Oceanography*, 46(1): 3—22
- Sharples J, Tweddle J F, Green J A M *et al*, 2007. Spring-neap modulation of internal tide mixing and vertical nitrate fluxes at a shelf edge in summer. *Limnology and Oceanography*, 52(5): 1735—1747
- Simmons H L, Hallberg R W, Arbic B K, 2004. Internal wave generation in a global baroclinic tide model. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(25—26): 3043—3068
- Tian J W, Zhou L, Zhang X Q *et al*, 2003. Estimates of M_2 internal tide energy fluxes along the margin of Northwestern Pacific using TOPEX/POSEIDON altimeter data. *Geophysical Research Letters*, 30(17): 1889, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2003GL018008/full>
- Tian J W, Zhou L, Zhang X Q, 2006. Latitudinal distribution of mixing rate caused by the M_2 internal tide. *Journal of Physical Oceanography*, 36(1): 35—42
- Zhao Z, Alford M H, Giron J *et al*, 2011. Internal tides around the Hawaiian Ridge estimated from multisatellite altimetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C12): C12039
- Zhao Z X, 2014. Internal tide radiation from the Luzon Strait. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119: 5434—5448
- Zhao Z X, 2016. Using CryoSat-2 altimeter data to evaluate M_2 internal tides observed from multisatellite altimetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(7): 5164—5180
- Zhao Z X, Alford M H, 2009. New altimetric estimates of mode-1 M_2 internal tides in the central north Pacific Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 39(7): 1669—1684
- Zhao Z X, Alford M H, Giron J B, 2012. Mapping low-mode internal tides from multisatellite altimetry. *Oceanography*, 25(2): 42—51

USING MULTISATELLITE ALTIMETRY TO ESTIMATE ENERGY FLUXES IN SOUTH CHINA SEA

MA Jing-Yi^{1,2,3}, XU Yong-Sheng^{1,3}

(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China*)

Abstract The topography of the Luzon Strait varies greatly, resulting in frequent internal tides important for ocean water mixing. We use several satellite altimeters to detect the energy fluxes around the Luzon Strait. It includes J₂, J_{1T}, G_{FO}, and EN, which are used in 21st century. In addition, we use the data from WOA to calculate eight main tide components in the ocean: K₁, K₂, M₂, N₂, O₁, P₁, Q₁, and S₂, and only for mode-1 part. The results showed in the selected area, diurnal tides are the main part, K₁ is the largest one. In the semidiurnal tides, M₂ is the biggest one. However, as for the internal tides, the energy flux of M₂ is the biggest one which get to 6.45GW in Luzon Strait. At most places of selected area, the energy flux of internal tides is very small. And the energy fluxes of diurnal tides in the middle part of Luzon Strait are larger than the south part of it. But for the semidiurnal tides, the result is opposite.

Key words South China Sea; internal tides; energy; altimeter satellite