

# Rossby 波临界周期与海面高度异常能谱临界周期在南海的空间分布特征

杨棋<sup>1,2,3</sup>, 陈桂英<sup>1</sup>, 尚晓东<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 上海海洋气象台, 上海 201300)

**摘要:** 本文利用 WOA01(the Word Ocean Atlas 2001)海水各层气候态温盐数据计算南海 Rossby 波临界周期, 并与其在同纬度西北太平洋中的分布对比。结果显示, 在南海中 Rossby 波临界周期随纬度增加而逐渐增加, 并且由于南海的特殊地形, 海盆中 Rossby 波临界周期呈北东—南西向分布, 与其在大洋中呈纬向带状分布不同。通过分析南海各网格点上海面高度异常(SSHA, the sea surface height anomaly)的能谱, 我们发现在海盆中部其临界周期与当地 Rossby 波临界周期基本相同, 其值也随纬度增加而逐渐增加, 因而从观测上验证了模式结果, 即在海面风应力旋度能谱临界周期小于等于当地 Rossby 波临界周期的条件下, 海洋响应能谱临界周期等于当地 Rossby 波临界周期。

**关键词:** 临界周期; 南海; Rossby 波; SSHA 能谱; 风应力旋度

中图分类号: P731.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)04-0020-06

## Distribution characteristics of critical periods of Rossby waves and sea-surface height anomaly power spectra in the South China Sea

YANG Qi<sup>1, 2, 3</sup>, CHEN Gui-ying<sup>1</sup>, SHANG Xiao-dong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China; 2. Graduate University of CAS, Beijing 100049, China; 3. Shanghai Marine Meteorological Center, Shanghai 201300, China)

**Abstract:** Using the climatological ocean temperature and salinity data from the Word Ocean Atlas 2001 (WOA01), the authors analyze the distribution of Rossby waves' critical periods in the South China Sea (SCS) and compare the distribution in the SCS with that in the Northwest Pacific at the same latitude. The result shows that Rossby waves' critical periods become longer at higher latitudes. Because of the special topography in the SCS, the isolines of Rossby waves' critical periods in the SCS stretch in a northeast-southwest direction rather than zonally as in the North Pacific. From analyzing the power spectra of the sea-surface height anomalies (SSHA) in the SCS, we find that in the central SCS each of the SSHA power spectral critical periods is close to the local Rossby waves' critical period and presents similar change of the Rossby critical period as latitude increases. From observations, they validate the theoretical prediction that when the critical period of the wind stress curl power spectrum is equal or smaller than that of the local Rossby waves' the critical period of the ocean responding power spectrum equals to that of the local Rossby waves'.

**Key words:** critical period; the South China Sea; Rossby wave; sea-surface height anomaly power spectrum; wind stress curl

Rossby 波临界周期是研究大气强迫如何通过海洋 Rossby 波影响海洋上层能量的一个重要方面。

Lin 等<sup>[1]</sup>将大气强迫与 Rossby 波临界周期的大小关系划分为 3 种情况: 1) 振荡周期小于 Rossby 波临界

收稿日期: 2009-04-02; 修订日期: 2009-05-22。卢冰编辑

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-YW-12-01); 中国科学院领域前沿项目(LYQY200702); 国家自然科学基金(40776008, 40976010)

作者简介: 杨棋(1983—), 女, 四川省攀枝花市人, 硕士研究生, 从事物理海洋学研究。

通信作者: 尚晓东。E-mail: xdshang@scsio.ac.cn

周期的大气强迫不能激发出 Rossby 波; 2) 振荡周期大于 Rossby 波临界周期的大气强迫激发出对应周期的 Rossby 波, 能量通过 Rossby 波输入海洋, 并且随着 Rossby 波东移或西移传播至大洋边界; 3) 振荡周期接近 Rossby 波临界周期的大气强迫激发出群速度较小甚至为零的 Rossby 波, 大气输入海洋的能量通过 Rossby 波在当地聚积, 从而造成海洋对应周期能量的增加。Rossby 波临界周期是当地 Rossby 波能够存在的最小周期, 其等值线在大洋中基本呈纬向带状分布, 其值由低纬向高纬增大<sup>[1]</sup>。Rossby 波只能存在于对应临界周期等值线所在的纬度附近及更低纬一侧<sup>[2]</sup>。海面高度异常(SSHA, the sea surface height anomaly)数据可以反映海表能量在时域和频域上的分布特征<sup>[3-5]</sup>。Lin 等<sup>[1]</sup>对比全球中低纬(40°以下)海洋中不同周期的 SSHA 能量带和同周期 Rossby 波临界周期的分布, 发现两者有很好的对应关系: 若 Rossby 波的周期大致等于所在纬度处 Rossby 波的临界周期, 其能量在当地聚积, 引起对应周期 SSHA 的能量增加。大气强迫与 Rossby 波临界周期的关系还可以从单点上的海洋响应能谱反映出来<sup>[6]</sup>。Muller 和 Frankignoul<sup>[7]</sup>从一个地形平坦、水平无边界以及线性耗散的模式中得到: 在大气强迫尺度范围很大时(即从远大于 Rossby 波临界周期延伸到远小于 Rossby 波临界周期), 海洋响应的动能能谱大于等于 Rossby 波临界周期的部分能量较大, 能谱从小于 Rossby 波临界周期处开始迅速衰减。Lippert 和 Kase<sup>[8]</sup>利用线性强迫和具有东边界的模式进行试验, 结果表明在能谱临界周期不同的海面风应力旋度强迫下, 响应能谱临界周期做如下变化: 当风应力旋度能谱的临界周期大于 Rossby 波临界周期时, 响应能谱的临界周期会随着风应力旋度能谱的临界周期的增大而增大, 但当风应力旋度能谱的临界周期在小于等于 Rossby 波临界周期的范围变动时, 响应能谱的临界周期不受其影响, 由当地 Rossby 波临界周期决定。

综上所述, 相关研究主要关注了大洋中 Rossby 波在接近其临界周期所在纬度时引起对应周期能量在这一纬度聚积的现象, 以及利用简单模式研究大洋中 Rossby 波临界周期与海洋响应能谱临界周期的关系。但是实际海洋地形起伏、边界条件复杂, 上述模式结果在海洋中能否普遍成立还有待研究。南海作为一个半封闭的边缘海受到季风控制, 比较能够代表复杂的实际海洋, 因此本文选择这一区域的实测数据来验证模式结果。根据文献[8]我们用风应

力旋度表征大气强迫, 如果模式结果正确, 在风应力旋度能谱的临界周期小于等于 Rossby 波临界周期时, 应该存在 SSHA 能谱临界周期与 Rossby 波临界周期的对应关系, 而且 SSHA 能谱临界周期应该与 Rossby 波临界周期有着相同的纬向变化特征。

## 1 资料及分析方法

本文中海水各层温盐数据采用了 WOA01 气候态数据<sup>[9]</sup>, 水平空间分辨率为 $(1/4)^\circ \times (1/4)^\circ$ , 垂向上数据分布在从海表到-5500m 的每个标准层上。同时采用 1993 年 1 月到 2005 年 12 月的 CLS Space Oceanographic Division of Toulouse, France 海面高度异常数据作谱分析, 时间分辨率为 1 周, 空间分辨率为 $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$ 。由于卫星高度计潮汐模型不准确<sup>[5]</sup>导致 SSHA 数据误差较大, 这里只研究水深大于 200m 等深线的海域。海面 10 米风场来自 QSCAT 数据<sup>[10]</sup>, 时间分辨率为 1 天, 空间分辨率为 $(1/4)^\circ \times (1/4)^\circ$ , 数据从 1999 年 7 月 19 日到 2008 年 9 月 29 日。由于 SSHA 的空间分辨率为 $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$ , 与 $(1/4)^\circ \times (1/4)^\circ$ 的 WOA01 温盐数据不一致, 为了对比两者的分析结果, 将 SSHA 数据插值为 $(1/4)^\circ \times (1/4)^\circ$ , 使之与 WOA01 的空间分辨率一致。

南海和同纬度西北太平洋中 Rossby 波临界周期按照 Lin 等<sup>[1]</sup>的方法计算:

$$T_c = 2\pi/\omega_c \quad (1)$$

$$\omega_c \approx \beta c_1 / 2f \quad (2)$$

其中  $T_c$  为 Rossby 波临界周期,  $\omega_c$  为 Rossby 波临界周期所对应的临界频率,  $c_1$  为第一斜压 Rossby 波的相速度,  $f = 2\Omega \sin\theta$ ,  $\beta = 2\Omega \cos\theta/R$ ,  $\Omega$  和  $R$  分别为地球自转角速度以及地球半径,  $\theta$  为 Rossby 波所在纬度。公式(2)来自于纬向传播的 Rossby 波的频散关系:

$$\omega = \frac{\beta k}{k^2 + f^2/c_1^2} = \frac{\beta}{k + \frac{f^2/c_1^2}{k}} \leq \frac{\beta c_1}{2f} \quad (3)$$

其中  $k$  为纬向波数, 公式(2)成立的条件是  $k = f/c_1 \approx 10^{-5}(\text{cycle} \cdot \text{m}^{-1})$ , 此时纬向波数  $k$  接近零, 对应波长为 100km 左右的行星 Rossby 波, 波在纬向上群速度接近零, 能量几乎不传播, 此时的  $\omega$  即为临界频率  $\omega_c$ 。本文之后提到的 Rossby 波相速度均指第一斜压 Rossby 波相速度。Rossby 波以第一斜压 Rossby 波的能量为主<sup>[1]</sup>, 根据 Chelton 等<sup>[11]</sup>的计算方法, 第一斜压 Rossby 波相速度的计算公式为:

$$c_1 \approx \frac{1}{\pi} \int_{-H}^0 N(z) dz \quad (4)$$

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho}{dz} \quad (5)$$

其中  $H$  为局地海水的深度,  $N$  为浮力频率,  $\rho$  为位密,  $\rho_0$  为参考密度,  $z$  为垂向深度。利用气候态  $(1/4)^\circ \times (1/4)^\circ$  的温盐数据计算海水各标准层上的位密  $\rho$  和参考密度  $\rho_0$ , 然后进一步计算对应层上的浮力频率  $N$ , 最后对浮力频率垂直积分得到相速度  $c_1$ 。

南海 SSHA 能谱临界周期的确定方法<sup>[12]</sup>: 首先, 以 10 为底数的双对数坐标下做 SSHA 时间序列的能谱图; 然后, 为精确确定 SSHA 能谱的临界周期, 将 SSHA 能谱转化成对应的耗散谱(耗散谱的定义为能谱密度乘以频率的平方<sup>[13]</sup>); 最后, 耗散谱曲线用 6 次多项式进行拟合, 拟合曲线最大值所对应的周期即为 SSHA 能谱的临界周期。

为计算风应力旋度能谱, 先将海面日平均风速转化为风应力:

$$\tau_x = c_d \rho_1 |\bar{v}| u \quad (6a)$$

$$\tau_y = c_d \rho_1 |\bar{v}| v \quad (6b)$$

其中  $\tau_x$  和  $\tau_y$  为纬向和经向上的风应力,  $c_d$  为拖曳系数, 对应风速  $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  拖曳系数取为  $1.03 \times 10^{-13}$ <sup>[14]</sup>,  $\rho_1$  为海水密度, 取为常值  $1.23\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\bar{v}$  为风速矢量,  $u$  和  $v$  分别为纬向和经向上的风速分量。再对风应力求旋度, 得到每日的风应力旋度时间序列。最后计算风应力旋度时间序列的能谱以及能谱临界周期, 与处理 SSHA 数据的方法相似。

SSEA 能谱和风应力旋度能谱都反映的是能量在频域上的分布特征, 两者时间段的不一致不影响对两者能谱临界周期的判断和对比分析, 而且为了尽量准确的反映低频部分的特征, 计算 SSEA 能谱和风应力旋度能谱时都使用其最长的时间序列。

## 2 结果分析及讨论

### 2.1 南海 Rossby 波临界周期的分布

根据公式(1)–(4)做出南海及西北太平洋 Rossby 波临界周期的分布如图 1a 所示, 在西北太平洋 30 到 90 天的 Rossby 波临界周期由低纬到高纬呈纬向带状分布, 这与 Lin 等<sup>[1]</sup>分析结果一致; 但我们发现南海与大洋不同, 在南海 Rossby 波临界周期等值线发生倾斜, 呈 NE—SW 走向分布, 其原因分析如下: 由公式(1)–(3)可知, 在同一纬度上, 由于海水深度  $H$  与浮力频率  $N$  的不同, Rossby 波相速度  $c_1$  会不同, 并最终导致 Rossby 波临界周期  $T_c$  的不同。在图 1b 中我们给出南海和同纬度西北太平洋  $c_1$  的分布,  $c_1$  等值线自大洋经吕宋口向南海西南部延伸,

其中多条等值线与图 1c 中对应的等深线形状基本相似、位置基本重合, 如  $c_1=2.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  等值线与  $-3000\text{m}$  等深线, 以及  $c_1=2.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  等值线与  $-4000\text{m}$  等深线, 海水深度  $H$  越大的地方对应的  $c_1$  越大, 可见浮力频率  $N$  所表征的海水层结对  $c_1$  影响较小,  $c_1$  主要受海水深度  $H$  影响, 这与大洋中的观测一致<sup>[15]</sup>。同纬度南海的水深浅于大洋, 导致南海  $c_1$  偏小以及 Rossby 波临界周期偏大。南海中  $-3000$  米等深线呈 NE—SW 走向分布, 造成  $c_1$  与 Rossby 波临界周期也呈 NE—SW 向分布。

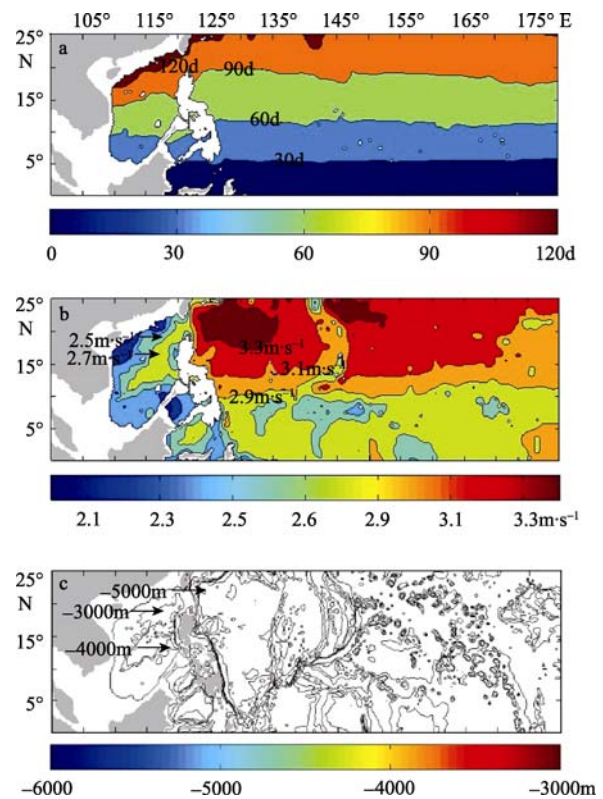


图 1 南海及西北太平洋中

a. Rossby 波临界周期的分布; b. Rossby 波相速度的分布; c. 地形深度的分布

Fig. 1 South China Sea and Northwest Pacific

a. Distribution of Rossby waves' critical periods; b. Distribution of the Rossby waves' phase speed; c. Depth of sea water

### 2.2 南海 SSEA 能谱临界周期的分布

沿经度  $115^\circ\text{E}$  由南到北从  $9^\circ\text{N}$  到  $18^\circ\text{N}$  每隔  $1.125^\circ$  等间距取 9 个点(点 a  $9^\circ\text{N}$ 、 $115^\circ\text{E}$ , 点 b  $10.125^\circ\text{N}$ 、 $115^\circ\text{E}$ , 点 c  $11.25^\circ\text{N}$ 、 $115^\circ\text{E}$ , 点 d  $12.375^\circ\text{N}$ 、 $115^\circ\text{E}$ , 点 e  $13.5^\circ\text{N}$ 、 $115^\circ\text{E}$ , 点 f  $14.625^\circ\text{N}$ 、 $115^\circ\text{E}$ , 点 g  $15.75^\circ\text{N}$ 、 $115^\circ\text{E}$ , 点 h  $16.875^\circ\text{N}$ 、 $115^\circ\text{E}$ , 点 i  $18^\circ\text{N}$ 、 $115^\circ\text{E}$ ), 在以 10 为底的双对数坐标下做每个网格点上 SSEA 时间序列的能谱图, 见图 2a—i。这 9 个能谱的低频部分能量较大, 而高频部分则从某一频率开始以一定指数衰减, 通常称这一频率为临界频

率<sup>[8]</sup>。图 2a—i 中用箭头标出每个能谱的临界周期。能谱小于临界周期的部分以一定指数  $\alpha$  衰减, 即

$$\text{PSD} \propto f^{\alpha} \quad (7)$$

能谱密度 PSD(the power spectral density)与频率  $f$  两者呈指数衰减, 其中  $\alpha$  被称作能谱斜率。将大于临界频率的能谱进行线性拟合以计算能谱斜率, 拟合直线与原曲线差值绝对值之和最小。大气强迫的尺度范围虽然很大, 但它只有周期大于等于 Rossby 波临界周期的部分才能激发 Rossby 波, 这部分能量通过 Rossby 波输送到海洋中, 使得对应周期的 SSHA 能谱容易维持在较高水平, 但小于 Rossby 波临界周期的 SSHA 能谱则由于缺少能量来源而容易衰减。

将图 2 中 9 个点的 SSHA 能谱转化成对应的耗散谱, 见图 3。耗散谱拟合曲线最大值所对应的周期即为 SSHA 能谱的临界周期。通过这种方法找到的临界周期与图 2 中通过观察确定的临界周期基本吻合。从图 3 看到, 在 115°E 由南到北的 9 个点上 SSHA 能谱临界周期与相应点上 Rossby 波临界周期 (图 3 中每个子图的右上方标出了对应点 Rossby 波的临界周期  $T_c$ ) 的差值不超过 10 天, 并且 SSHA 能谱临界周期同 Rossby 波临界周期一样随着纬度的增加而增加。

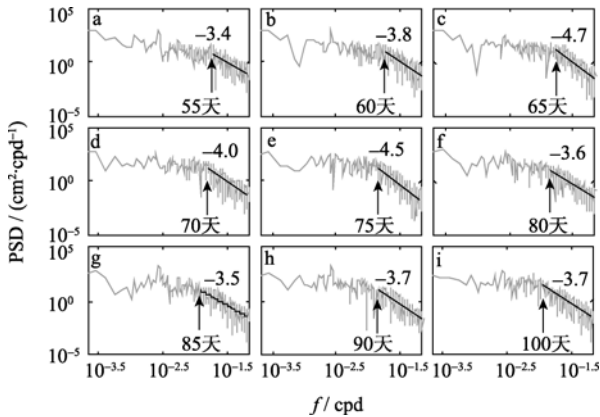


图 2 115°E 由南到北 9 个点上 SSHA 的能谱(灰色实线) 横坐标表示频率  $f$  (单位: cpd, 即 cycle per day), 纵坐标表示能谱密度 PSD (单位:  $\text{cm}^2 \cdot \text{cpd}^{-1}$ )。图中小于临界周期的能谱部分用黑色直线拟合, 在拟合直线上标出能谱斜率, 箭头指向临界周期所在处并标出其大小

Fig. 2 Nine SSHA power spectra (gray dashed lines) at the nine locations from south to north along 115°E

The abscissa represents the frequency  $f$ , (units: cpd; abbreviation for 'cycle per day'), the ordinate represents the power spectral density, PSD, (units:  $\text{cm}^2 \cdot \text{cpd}^{-1}$ ). The power spectra with periods smaller than their critical periods are fitted with straight lines above which are the values of corresponding slopes, and the power spectral critical periods are given by the arrowheads with the values marked beneath.

对比整个南海 SSHA 能谱临界周期值的分布图 (图 4) 和 Rossby 波临界周期的分布图 (图 1a), 我们发现在海盆中部 SSHA 能谱临界周期与 Rossby 波临界周期基本上对应, 在 10°N 以南两者均为 30—60 天, 在 10—15°N 之间两者均在 60—90 天, 在 15°N 以北两者均大于 90 天。同 Rossby 波临界周期一样, 在南海海盆中部 SSHA 能谱临界周期的等值线基本呈

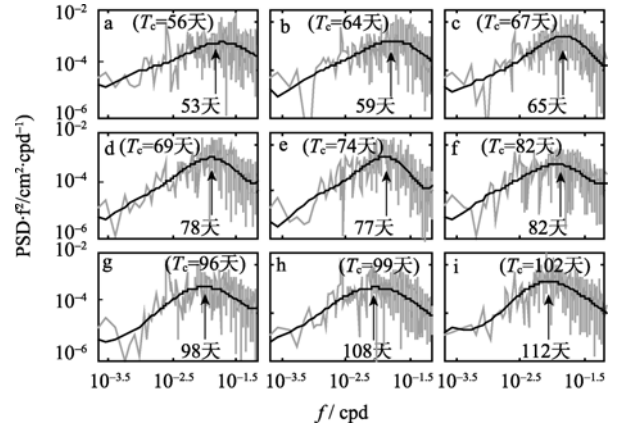


图 3 115°E 由南到北 9 个点上 SSHA 的耗散谱(灰色虚线)

横坐标表示频率  $f$ , 纵坐标表示耗散能谱密度  $\text{PSD} \cdot f^2$  (单位:  $\text{cm}^2 \cdot \text{cpd}$ )。图中拟合曲线用黑色实线表示, 其最高点处用箭头标出对应周期值的大小。图中还标出了对应点上 Rossby 波临界周期  $T_c$  的大小

Fig. 3 Nine SSHA dispersive spectra (gray dashed lines) at the nine locations from south to north along 115°E

The abscissa represents the frequency  $f$ , and the ordinate represents the dispersive spectral density,  $\text{PSD} \cdot f^2$ , (units:  $\text{cm}^2 \cdot \text{cpd}$ ). The dispersive spectra are fitted with dark curves; the corresponding periods for the highest values are given by the arrowheads with the values marked beneath. The Rossby waves' critical period for each location is also given.

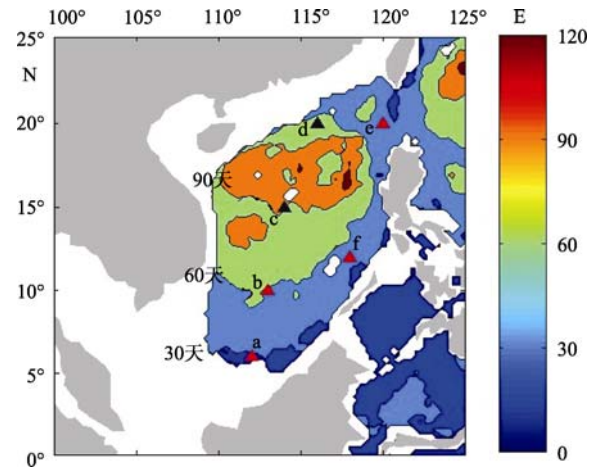


图 4 南海中 SSHA 能谱临界周期的分布

图中用三角标出了 6 个点(点 a—e), 下文将计算每个点上风应力旋度的能谱

Fig. 4 Distribution of SSHA power spectral critical periods in the South China Sea (units: day)

Wind stress curl power spectra at the six locations (dot a—e) marked by triangles are to be calculated

带状分布, 具有 NE—SW 向倾斜特征, 并且其大小随纬度的增加而增加。通过观测分析证实了模式结果的推论, 即在南海海盆中部 SSHa 能谱临界周期在空间分布上与 Rossby 波临界周期具有较好的一致性。SSHA 能谱临界周期与 Rossby 波临界周期的对应体现了海洋对大气强迫的响应。

### 2.3 讨论

如果风应力旋度能谱的临界周期大于 Rossby 波临界周期, 那么响应能谱的临界周期就不再等于 Rossby 波临界周期, 而等于风应力旋度能谱的临界周期<sup>[8]</sup>, 因此需要对南海海面上方的风应力旋度能否影响 SSHa 能谱的临界周期进行判断。在图 4 中用三角符号标出了 6 个点(a 点 112°E、6°N, b 点 113°E、10°N, c 点 114°E、15°N, d 点 116°E、20°N, e 点 120°E、20°N 和 f 点 118°E、12°N)。各点上风应力旋度能谱(见图 5a—f)形式基本相同, 临界周期均为 10 天左右, 远小于南海中 Rossby 波临界周期(从低纬的 1 个月到高纬的 4 个月), 所以南海中风应力旋度能谱的临界周期不影响 SSHa 能谱临界周期的大小。

需要指出的是在海盆边缘 SSHa 能谱临界周期与 Rossby 波临界周期对应性较差。风应力旋度能谱在整个南海均具有相似的形式, 因而不是造成这种差异性的原因。而由于潮汐模型在海盆边缘误差较大, 这一区域 SSHa 数据准确性差, 从而可能成为 SSHa 能谱临界周期偏离 Rossby 波临界周期的原因之一。另外, Rossby 波的临界周期的计算基于线性理论, 而 SSHa 能谱既包括线性的又包括非线性的波动的能量, 在海盆边缘可能存在由地形引起的非线性波-波相互作用, 造成这些区域 SSHa 能谱的临界周期改变, 有可能使得其与 Rossby 波临界周期对应较差。

在南海海盆中存在大量的中尺度涡, SSHa 能谱尽管有部分的能量来自中尺度涡, 但中尺度涡旋所造成的雷诺应力也可以强迫出 Rossby 波, SSHa 能谱临界周期仍然可以与 Rossby 波临界周期相符。从南海海盆中 SSHa 能谱临界周期和 Rossby 波临界周期空间分布的对比来看, 虽然两者不完全一致,

但大体上有较好的对应。

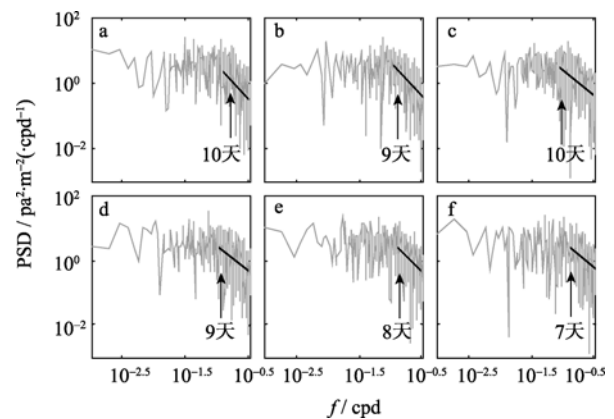


图 5 图 4 中三角所标出的各点上风应力旋度的能谱(灰色虚线)

横坐标表示频率  $f$ , 纵坐标表示能谱密度 PSD[单位:  $(\text{pa}^2 \cdot \text{m}^{-2}) \cdot \text{cpd}^{-1}$ ]. 图中小于临界周期的能谱用黑色直线拟合, 箭头指向临界周期所在处并标出其大小

Fig. 5 Six wind stress curl power spectra (gray dashed lines) for the six locations marked by triangles in Fig. 4

The abscissa represents the frequency,  $f$ , the ordinate represents the power spectral density, PSD, (units:  $(\text{pa}^2 \cdot \text{m}^{-2}) \cdot \text{cpd}^{-1}$ ). The power spectra with periods smaller than their critical periods are fitted with straight lines, and the critical periods are given by the arrowheads with the values given beneath.

### 3 小结

本文用 WOA01 气候态的温盐数据分析了在南海中 Rossby 波临界周期的分布与其在大洋中的纬向带状分布不同, 呈 NE—SW 走向。南海中-3000 米等深线基本呈 NE—SW 走向, 影响了南海中 Rossby 波相速度等值线的分布, 最终造成在南海 Rossby 波临界周期分布与大洋中不同。对比 SSHa 能谱临界周期与 Rossby 波临界周期两者在南海的空间分布, 本文从观测上验证了模式结果的推论, 即在南海海盆中部海面风应力旋度能谱临界周期小于当地 Rossby 波临界周期条件下, SSHa 能谱临界周期基本等于当地 Rossby 波临界周期, 并且在空间分布上和 Rossby 波临界周期一样呈 NE—SW 向带状分布, 随纬度的增加而增加。而在海盆边缘 SSHa 能谱临界周期和 Rossby 波临界周期对应性较差, 其原因还有待进一步研究。

### 参考文献

- [1] LIN XIAOPEI, YANG JIANYAN, WU DEXING, et al. Explaining the global distribution of peak-spectrum variability of sea surface height[J]. Geophys Res Lett, 2008, 35: L14602, doi: 10.1029/2008GL034312.
- [2] LONGUET-HIGGINS M S. Planetary waves on a rotating sphere[J]. Philos Trans R Soc London, Ser A, 1964, 279 (1379): 446–473.
- [3] HU JIANYU, KAWAMURA H, HONG HUASHENG, et al.

- 3–6 months variation of sea surface height in the South China Sea and its adjacent ocean[J]. *J Oceanogr*, 2001, 57: 69–78.
- [4] STAMMER D. Global characteristics of ocean variability estimated from regional TOPEX/POSEIDON altimeter measurements[J]. *J Phys Oceanogr*, 1997, 27(8): 1743–1769.
- [5] HWANG C W, CHEN S A. Fourier and wavelet analyses of TOPEX/Poseidon-derived sea level anomaly over the South China Sea: A contribution to the South China Sea Monsoon Experiment[J]. *J Geophys Res*, 2000, 105(C12): 28785–28804.
- [6] FRANKIGNOUL C, MULLER P, ZORITA E. A simple model of the decadal response of the ocean to stochastic wind forcing[J]. *J Phys Oceanogr*, 1997, 27(8): 1533–1546.
- [7] MULLER P, FRANKIGNOUL C. Direct atmospheric forcing of geostrophic eddies[J]. *J Phys Oceanogr*, 1981, 11(3): 287–308.
- [8] LIPPERT A, KASE R H. Stochastic wind forcing of baroclinic Rossby waves in the presence of a meridional boundary [J]. *J Phys Oceanogr*, 1985, 15(2): 184–194.
- [9] National Oceanographic Data Center. World Ocean Atlas 2001 (WOA01) [DB/OL]. Silver Spring, MD: National Oceanographic Data Center [2009–04–02]. [http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA01/qd\\_ts01.html](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA01/qd_ts01.html).
- [10] REMOTE SENSING SYSTEMS. QSCAT[DB/OL]. Santa Rosa, CA: Remote Sensing Systems [2009–04–02]. <http://www.remss.com>.
- [11] CHELTON D B, DESZOEKE R A, SCHLAX MG, et al. Geographical variability of the first baroclinic Rossby radius of deformation[J]. *J Phys Oceanogr*, 1998, 28(3): 433–460.
- [12] SHANG XIAODONG, XIA KEQING. Scaling of the velocity power spectra in turbulent thermal convection[J]. *Phys Rev E*, 2001, 64, 065301.
- [13] 是勋刚. 湍流[M]. 天津: 天津大学出版社, 1994: 60.
- [14] ROBERT H S. Introduction to physical oceanography[M]. College Station: Texas A & M University, 2004: 49.
- [15] KILLWORTH P D, CHELTON D B, DE SZOEKE R A. The speed of observed and theoretical long extratropical planetary waves[J]. *J Phys Oceanogr*, 1997, 27(9): 1946–1966.