

# 南海北部陆坡海域内波谱特征

尚晓东, 卢著敏, 谢晓辉, 陈桂英

(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)

**摘要:** 本文对1998年南海季风实验中定点观测的声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)海流数据进行频谱分析, 结果表明南海北部地区内波之间的非线性作用的强弱影响着该海域的内波谱特征。在季节性温跃层(水深22m和58m)中, 由于存在着强的非线性作用, 内波带的谱斜率趋于 $\sigma^{-1}$ 和 $\sigma^{-2}$ 之间, 而且较高能量的潮谐波频率的峰值随着频率呈现少见的 $\sigma^{-3}$ 递减。在季节性温跃层(水深130m)以下, 内波非线性相互作用较弱, 观测的内波带谱特征与标准Garrett-Munk内波谱相似, 均显示了 $\sigma^{-2}$ 的谱斜率。

**关键词:** 内波; 非线性; 动能谱; 南海北部; 旋转谱

中图分类号: P731.24

文献标识码: A

文章编号: 1009-5470(2009)03-0016-05

## Characteristics of internal-wave spectra on the continental slope of northern South China Sea

SHANG Xiao-dong, LU Zhu-min, XIE Xiao-hui, CHEN Gui-ying

(LED, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China)

**Abstract:** The authors analyze the internal wave spectra of the ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) data from the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX) in 1998. The results suggest that the level of nonlinear interactions amongst internal waves affects the characteristics of internal wave spectra in the north South China Sea. In the seasonal thermocline (depths of 22 m and 58 m), the falloff rate of the spectra with frequency  $\sigma$  trends to fall between  $\sigma^{-1}$  and  $\sigma^{-2}$  for internal-wave band due to strong nonlinear interactions; furthermore, tidal harmonic frequency peaks with high energy show an amplitude decrease of  $\sigma^{-3}$  with frequency. Below the seasonal thermocline (depth 130 m), the nonlinear interactions are weakened with increasing depth so that the internal wave spectrum is similar to canonical Garrett-Munk spectrum, both showing a falloff rate of  $\sigma^{-2}$ .

**Key words:** internal wave; nonlinearity; kinetic energy spectra; northern South China Sea; rotary spectrum

在纬度小于 $30^\circ$ 范围内, 海洋内波频谱( $f < \sigma < N$ ,  $f$ 为惯性频率,  $N$ 为浮力频率)中以全日内潮, 半日内潮, 和近惯性内波为主。近年来, 一些海域的许多观测都表明了惯性运动和半日内潮在内波频带上能量的传递起着重要作用<sup>[1,2,3]</sup>, 而这种能量传递主要依靠近惯性运动—内潮或者内潮—内潮之间强的非线性耦合作用; 同时, Xing和Davies<sup>[4]</sup>通过数值模拟证明了这种非线性相互作用的主要机制是非线性平流和垂直剪切的作用, 而内波

之间的这种非线性作用能明显地改变内波谱特征<sup>[5]</sup>, 此外, 观测点的内波谱的特征也与其距离内波相互作用源区的远近有关<sup>[5]</sup>。

南海东北部地区, 由于大振幅非线性内波活动频繁, 近年来, 国内外许多学者对该海域的内波进行了大量的观测及数值模拟研究, Cai等<sup>[6]</sup>在理论上揭示了不同条件下内潮波在南海东北部地区的演化。张效谦等<sup>[7]</sup>在该地区一观测点调查了水深450m以上浅水层内潮的变化。2001年的国际亚洲

收稿日期: 2008-11-10; 修订日期: 2009-02-21。卢冰编辑

基金项目: 中国科学院南海海洋研究所领域前沿项目(LYQY200702, SQ200813); 国家自然科学基金(40776008); 中国科学院重大科研装备研制项目(YZ200745)。

作者简介: 尚晓东(1962—), 山西运城市人, 研究员, 从事海洋湍流与海洋混合方面的研究。Email: xdshang@scsio.ac.cn。

声学实验对南海北部地区的内潮和非线性内波作了深入的调查与分析, Duda 等<sup>[8]</sup>通过获取的资料对该地区内潮进行了深入研究, 结果显示在观测海域存在明显的全日内潮及相对较弱的半日内潮, 其中全日内潮  $K_1$ 、 $O_1$  在全日分量中占主要优势。在 1998 年南海季风实验 (South China Sea Monsoon Experiment, SCSMEX) 的科考调查中, Guo 等<sup>[9]</sup>通过分析该实验观测数据, 指出了该海区全日内潮能量大于半日内潮能量, 而全日分量  $K_1$ 、 $O_1$  和半日分量  $M_2$  占主要成分, 这与 Duda 等<sup>[8]</sup>的观测相一致; Xie 等<sup>[10]</sup>也通过观测资料证实在南海北部地区存在半日内潮  $M_2$  的参数化次谐波不稳定机制 (Parameter Subharmonic Instability, PSI)。虽然对南海内波已进行过大量的研究, 但是大多都仅限于对内潮和孤立子波的研究, 而对于内波的非线性特征谱的分析研究仍然非常缺乏。本文拟通过定点海流数据来揭示内波非线性作用及内波谱特征。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据

1998 年 5 月 5—26 日南海季风实验期间, “实验 3” 号科学考察船锚定于东沙岛南部的大陆坡附近 ( $116^{\circ}56.6'E$ ,  $20^{\circ}21.3'N$ , 图 1) 通过 vm-300kHz 声学多普勒流速剖面仪 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) 获得 20 天长的海流数据。垂向采样间隔 4m, 采样时间间隔 3 分钟, 有效深度范围从 10—134m, 观测期间, Mark III 型温盐深测量仪 (CTD) 用于收集温盐数据。

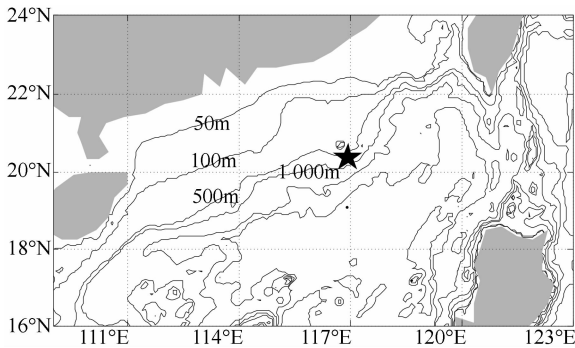


图 1 锚定位置

星号代表锚定位置, 黑线代表深度等值线

Fig. 1 Mooring location (star), with black lines representing depth contours

### 1.2 方法

本文主要运用所测得的水平流速进行动能谱和旋转谱分析, 对于动能谱和旋转谱的计算方法和物

理意义, Gonella<sup>[11]</sup>已经做了详细的说明, 在此, 我们也做一下简单介绍。

首先, 对水平流速 ( $u, v$ ) 进行调和与分析得到  $n$  个分谐波 (这里  $u$  为东西分量,  $v$  为南北分量), 假设第  $n$  个分量的谐波为  $(u_n, v_n)$ , 那么:

$$\begin{aligned} (u_n, v_n) &= [U_n \cos(\sigma_n t - \varphi_{u_n}), V_n \cos(\sigma_n t - \varphi_{v_n})] \\ &= \text{Re}[\tilde{u} \exp(-i\sigma_n t), \tilde{v} \exp(-i\sigma_n t)] \end{aligned}$$

这里  $\tilde{u} = U_n \exp(i\varphi_{u_n})$ ,  $\tilde{v} = V_n \exp(i\varphi_{v_n})$ , ( $U, V$ ) 为谐波振幅,  $i^2 = -1$ ,  $\sigma$  是谐波频率,  $t$  为时间,  $\varphi$  为谐波相位,  $\text{Re}$  表示取实部。接着我们把水平流速变成复数形式, 可以得到:

$$\begin{aligned} \omega &= u_n + iv_n \\ &= \omega_+^* \exp(i\sigma_n t) + \omega_- \exp(-i\sigma_n t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{其中, } \omega_+ = (\tilde{u} - i\tilde{v})/2 \quad (2a)$$

$$\omega_- = (\tilde{u} + i\tilde{v})/2 \quad (2b)$$

$\omega_+$  为该谐波的逆时针旋转分量, 而  $\omega_-$  为该谐波的顺时针旋转分量, 这里  $\omega_+^*$  表示  $\omega_+$  的共轭复数。Gonella<sup>[11]</sup>根据上面旋转分量的谱性质, 定义了逆时针旋转谱  $p_+(\sigma)$ :

$$p_+(\sigma) = \langle \omega_+ \rangle^* \langle \omega_+ \rangle / 2 \quad (3a)$$

和顺时针旋转谱  $p_-(\sigma)$ :

$$p_-(\sigma) = \langle \omega_- \rangle^* \langle \omega_- \rangle / 2 \quad (3b)$$

这里尖括号表示傅立叶变换, 那么动能谱就为这两种谱之和, 即:

$$p(\sigma) = p_+(\sigma) + p_-(\sigma) \quad (4)$$

由于顺时针和逆时针旋转谱特性不同, Gonella<sup>[11]</sup>使用它们来描述内波频带中各主要内波的运动特征, 为了能更直接地描述, 他引进了旋转系数  $C_R(\sigma)$ :

$$C_R(\sigma) = \frac{|p_-(\sigma) - p_+(\sigma)|}{p(\sigma)} \quad (5)$$

这里, 当  $C_R = 0$  表示纯直线运动, 当  $C_R = 1$  时表示纯圆周运动, 它表明了流体穿越椭圆平面的方向, 顺时针或逆时针。在线性扰动并且不考虑摩擦应力作用的情况下, 方程 (5) 变为:

$$C_R(\sigma) = \frac{2\sigma f}{\sigma^2 + f^2} \quad (6)$$

在这些条件下, 内波能够自由传播。在内波频带中, 方程 (6) 可以用来描述自由波的特征<sup>[10]</sup>, 被称为内波极化方程。

在谱分析中, 我们使用平滑来改变谱的自由度:  $\nu \approx 2-26$  自由度。整个 20 天的时间序列直接做谱估计而没有进一步的平滑, 得到  $\nu \approx 2$  自由度的未平滑谱, 像这样的未平滑谱对于研究一些确定性的潮汐运动是很有用的。整段数据分 15 段, 50% 数据重叠, 然后平均各段谱估计值, 得到  $\nu \approx 26$  自由度的中等平滑谱, 这与标准 Garrett-Munk

内波谱相似, 因此方便与之比较。另外, 本文中谱斜率是关注的焦点, 估计谱峰值的斜率可以直接通过谱峰值进行线性拟合而获得, 而未平滑谱和平滑谱的斜率估计, 则是在平滑谱上确定近似直线的区间后对该区间的数据进行直线拟合得到的。

## 2 结果分析

图 2 给出了 1998 年 5 月份观测期间平均温盐和浮力频率  $N$  的深度剖面图, 可以看出整个观测期间, 平均混合层厚度小于 20m, 而浮力频率在 50m 深度附近达到最大值, 约 280 cpd ( $1\text{cpd} = 2\pi/86400\text{ s}^{-1}$ ), 且出现了‘双峰’结构, 这些都表明了该海区存在着强的层结结构, 有利于内波的产生和传播, 因此, 在本文的分析中, 我们特别选择了这两个跃层附近的深度(22m 和 58m)与另一个跃层(130m)以下深度来进行分析比较。此外, 在对应每一层深度的动能谱中, 我们发现局地频率中最大的能量主要集中在惯性频率与半日潮频率带之间(图 3, 4, 5 上由  $f$ , D1, D2 标明), 其中上表层近惯性运动比较强; 其次, 在整个深度范围内除了上表层的个别深度外, 全日潮能量均大于半日潮能量<sup>[8]</sup>。

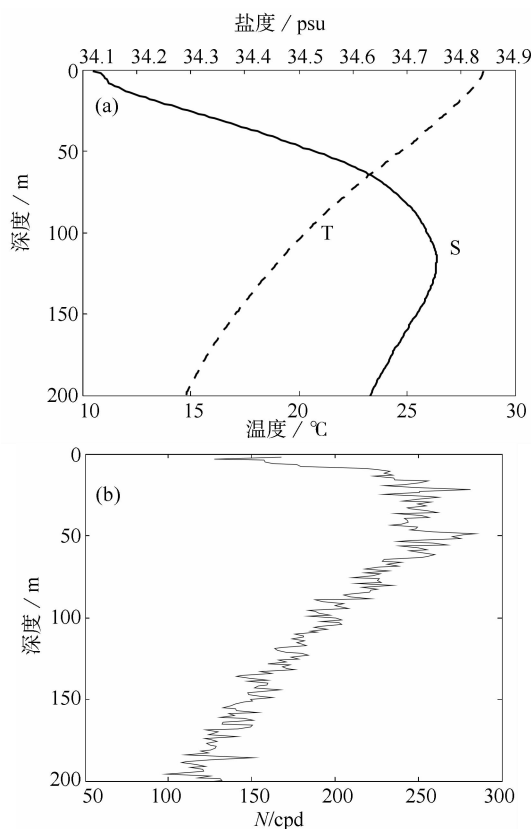


图 2 锚定位置海水的温盐廓线(a)和浮力频率廓线(b)

Fig. 2 Profiles of temperature and salinity (a) and buoyancy frequency (b) at mooring location

图 3 给出 22m 深的动能谱和旋转系数谱, 其中图 3(a)中, 黑线表示未平滑动能谱, 红线表示中等平滑的动能谱, 为清楚起见, 我们将平滑动能谱向下平移 2 个对数单位。在图 3 的平滑谱上, 最明显的峰值出现在半日频带 D2 上(‘Dx’,  $x=1, 2, 3, \dots, 10$  分别表示全日、半日、三分之一日、……十分之一日的谐波频带)。在未平滑谱上, 惯性频带( $f$ )和全日频带(D1)能够被清晰地分辨出来, 他们的峰值均小于半日峰值。除了这几个内波带最常见的峰值外, 明显的峰值也出现在了更高潮谐波频带上, 这些峰值中有我们比较熟悉的 D4, D6 等偶数潮汐谐波频带, 这在其它海域都有相似的观测<sup>[1,2]</sup>, 特别是最明显峰值 D4 分量能够通过半日内潮 D2 本身的非线性平流作用产生<sup>[4]</sup>。与较高

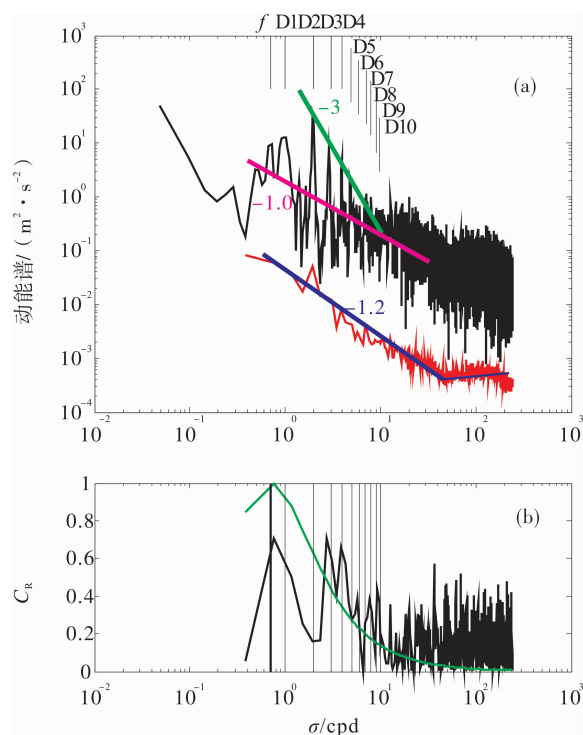


图 3 22m 深的未平滑动能谱(a)和旋转系数  $C_R$ (b)

(a)黑线为未平滑动能谱(自由度  $\nu \approx 2$ )、红线为中等平滑(自由度  $\nu \approx 26$ )的动能谱(为清楚起见, 平滑动能谱向下平移 2 个对数单位)、蓝色代表谱斜率 -1.2、绿色代表谱斜率 -3、粉色代表谱斜率 -1.0;

(b)由方程(5)计算的中等光滑旋转系数  $C_R$ , 绿线表示方程(6)

计算的中等光滑旋转系数  $C_R$

Fig. 3 Kinetic energy(a) and rotary coefficient spectra(b) at 22 m depth

(a)Black line represents nearly raw ( $\nu \approx 2$  degrees of freedom) kinetic energy spectrum; red line represents moderately smoothed ( $\nu \approx 26$  degrees of freedoms) kinetic energy spectrum (offset by  $10^{-2}$  in vertical for clarity); blue, green, and pink line represent spectral slope rate of -1.2, -3 and -1.0, respectively

(b)Moderately smoothed rotary coefficient  $C_R$  as in equation (5); green line is results of equation (6)

纬度观测<sup>[1,2]</sup>不同的是，在我们的观测中，D3, D5 等奇数潮谐波频带也出现了明显的峰值。显然，它们与南海北部地区存在着强的全日内潮有关。这些全日和半日的潮谐波被叠加在谱斜率为  $\sigma^{-1}$  的连续谱上。对比这个倾斜的连续谱，那些潮谐波峰值随频率以  $\sigma^{-3}$  下降。由于这些潮谐波峰值的影响，平滑谱在  $f < \sigma < 40$  cpd 范围内显示出约为  $-1.2$  的谱斜率。同时，当  $\sigma > 40$ cpd，我们能发现斜率突然变平，甚至稍微往上翘，这与观测期间出现大振幅非线性孤立子内波群有关<sup>[12]</sup>。而在该深度所对应的旋转系数谱上(图 3(b))，我们可以发现半日潮主要为近直线运动，与方程(6)对应的半日内潮波的旋转系数相差较大，表明了半日潮在该深度以正压运动为主，与重力内波无关。相反，那些更高频率的潮谐波的旋转系数值与方程(6)对应的自由内波旋转场特征相似(图 3(b))，表明它们为非线性内波，是通过内潮波之间的非线性作用而增强<sup>[5]</sup>。

图 4 显示的是水深 58m 的动能谱和旋转系数谱，反应的是跃层的内波谱特征。与 22m 水深(图 3)不同的是 58m 深度全日潮频带的能量最大，除了 D2 和 D3，高频的潮谐波分量的峰值不明显，D1、D2 和 D3 的峰值也以  $\sigma^{-3}$  衰减。这些峰值被叠加在谱斜率为  $\sigma^{-1}$  的连续谱上以至于平滑谱在  $f < \sigma < 40$  cpd 范围内斜率变为  $-1.7$ 。由图 4(b)可知，58m 水深的半日潮基本是直线运动，在观测期间以正压运动为主，而惯性和全日潮波几乎为圆周运动，均满足内波极化方程(6)，表明了这两种运动在观测期间以斜压运动为主。对于 D3，由于它主要来源于全日运动的垂直切变<sup>[9]</sup>，整个观测期间有着强的顺时针旋转运动特征，其旋转系数几乎与全日运动一致(图 4(b))。

图 5 给出的是 130m 水深的动能谱和旋转系数谱。与 22m、58m 水深的动能谱特征不同，在 130m 水深，高频的非线性内潮能量相对较弱。在平滑谱上的内波带范围内( $f < \sigma < 10$ cpd)，出现了斜率为  $-2$  的连续谱，与标准 Garrett-Munk 内波谱特征<sup>[13]</sup>相似，而且整个这段连续谱都与对应自由内波旋转特征基本一致(图 5(b))。

从以上的观测，我们可以看出：由非线性平流动力学机制所引起的内波之间的非线性作用在水深 22m 和 58m 要强于水深 130m，而这种非线性作用的强弱强烈地影响内波谱的特征。一方面，在 22m 水深，各种非线性潮谐波(D3, D4, D5 等)峰值较为突出，这些频带的峰值以  $\sigma^{-3}$  递减，说明各谐频之间有能量传递，体现了强的非线性作用；在 58m 水深，各种非线性潮谐波(D3, D4, D5 等)峰值仍

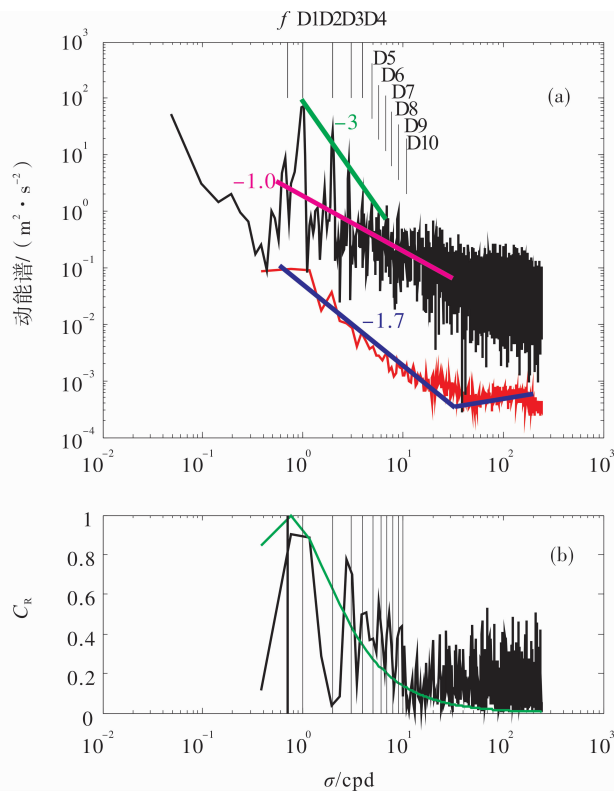


图 4 58m 深的动能谱(a)和旋转系数  $C_R$ (b)

(a)黑线为未平滑动能谱(自由度  $v \approx 2$ )、红线为中等平滑(自由度  $v \approx 26$ )的动能谱(为清楚起见，平滑动能谱向下平移 2 个对数单位)、蓝色代表谱斜率  $-1.7$ 、绿色代表谱斜率  $-3$ 、粉色代表谱斜率  $-1.0$ ；  
(b)由方程(5)计算的中等光滑旋转系数  $C_R$ ，绿线表示方程(6)计算的中等光滑旋转系数  $C_R$

Fig. 4 Kinetic energy (a) and rotary coefficient spectra (b) at 58 m depth

(a) Black line represents nearly raw ( $v \approx 2$  degrees of freedom) kinetic energy spectrum; red line represents moderately smoothed ( $v \approx 26$  degrees of freedoms) kinetic energy spectrum (offset by  $10^{-2}$  in vertical for clarity); blue, green, and pink line represent spectral slope rate of  $-1.7$ ,  $-3$  and  $-1.0$ , respectively  
(b) Moderately smoothed rotary rotary coefficient  $C_R$  as in equation (5); green line is results of equation(6)

较为突出但相对较小，虽然这些频带的峰值仍以  $\sigma^{-3}$  递减，但谐频之间的能量传递减弱，说明非线性作用在 58m 水深比在 22m 水强弱。另一方面，由于强的非线性作用，22m 水深的平滑谱的斜率相比其它深度较为平坦为  $-1.2$ ；在 58m 水深，由于内波之间的非线性作用减弱，加上相对强的全日运动，平滑谱的斜率相对较陡为  $-1.7$ 。同理，在 130m 水深，各种非线性潮谐波(D3, D4, D5 等)峰值明显减小，表明非线性作用进一步减弱；而且，平滑谱的斜率变得更为陡峭，它与不考虑该非线性作用的标准 GM 谱一致，都显示了一个  $\sigma^{-2}$  的谱斜率特征。

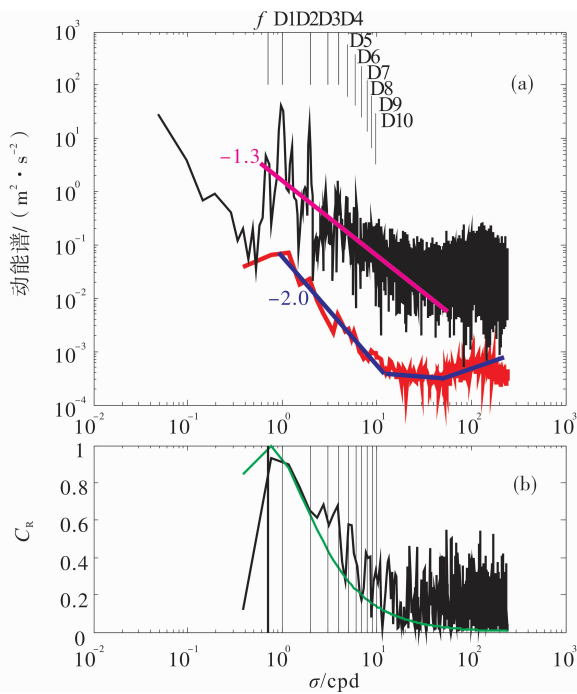


图 5 130m 深的动能谱(a)和旋转系数  $C_R$  (b)

(a) 黑线为未平滑动能谱(自由度  $\nu \approx 2$ )、红线为中等平滑(自由度  $\nu \approx 26$ )的动能谱(为清楚起见, 平滑动能谱向下平移 2 个对数单位)、蓝色代表谱斜率 -2、粉色代表谱斜率 -1.3;  
(b) 由方程(5)计算的中等光滑旋转系数  $C_R$ , 绿线表示方程(6)计算的中等光滑旋转系数  $C_R$

Fig. 5 Kinetic energy (a) and rotary coefficient spectra (b) at 130 m depth

(a) Black line represents nearly raw ( $\nu \approx 2$  degrees of freedom) kinetic energy spectrum; red line represents moderately smoothed ( $\nu \approx 26$  degrees of freedoms) kinetic energy spectrum (offset by  $10^{-2}$  in vertical for clarity); blue and pink line represent spectral slope rate of -2 and -1.3, respectively  
(b) Moderately smoothed rotary rotary coefficient  $C_R$  as in equation (5); green line is results of equation(6)

### 3 结论

利用谱分析方法对南海北部地区定点观测的海流数据进行分析, 揭示了内波非线性相互作用的频谱特征, 得到以下结论:

1. 动能谱观测表明, 南海北部陆坡区除了全日潮、半日潮、近惯性运动存在最大峰值外, D3、D4、D5 等较高调和潮频率也存在显著的峰值, 在 22m 和 58m 水深, 这些潮谐波峰值振幅随频率以  $\sigma^{-3}$  下降, 表明了由非线性平滑控制的强波一波相互作用。

2. 从旋转系数谱上看, 非线性高频内潮基本与自由内波的旋转谱系数(方程(6))一致。特别是在 130m 水深, 除去高频内波的影响, 内波带的旋转系数均很好地符合线性内波极化方程(6), 而且平滑谱特征和标准的 Garrett-Munk 谱一致, 表明

着弱的波一波相互作用。

3. 非线性作用的强弱能够决定着平滑谱的斜率特征, 非线性作用越强, 连续内波带将变得越平, 这也支持了 van Haren<sup>[5]</sup> 提出的假设: 离非线性作用源区越近, 非线性作用越强, 连续内波谱的白噪声越明显。

### 参考文献:

- [1] MIHALY S F, THOMSON R E, RABINOVICH A B. Evidence for nonlinear interaction between internal waves of inertial and semidiurnal frequency[J]. Geophys. Res. Lett., 1998, 25: 1205—1208.
- [2] VAN HAREN H, MASS L ZIMMERMAN J T F, et al. Strong inertial currents and marginal internal wave stability in the central North Sea[J]. Geophys Res Lett, 1999, 26 (19): 2993—2996.
- [3] VAN HAREN H, MASS L and VAN AKEN H. On the nature of internal wave spectra near a continental slope[J]. Geophys Res Lett, 2002, 29(12): 1615. doi: 10. 1029/2001GL014341.
- [4] XING J X and DAVIES A M, Processes influencing the nonlinear interaction between inertial oscillations, near inertial internal waves and internal tides[J]. Geophys Res Lett, 2002, 29: 1067—1070.
- [5] VAN HAREN H. Some observations of nonlinearly modified internal wave spectra[J]. J Geophys Res, 2004, 109, C03045. doi: 10. 1029/2001JC002136.
- [6] CAI S Q, LONG X M, LIU H L, et al. Tide mode evaluation under different condition[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(1): 104—112.
- [7] 张效谦, 梁鑫峰, 田纪伟. 南海北部 450m 以浅水层内潮和近惯性运动研究[J]. 科学通报, 2006, 50(18): 2027—2031.
- [8] 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]. Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29: 1105—1130.
- [9] GUO P, FANG W D, GAN Z J, et al. Internal tide characteristics over northern South China Sea continental slope [J]. Chinese Science Bullin, 2006, 51: 17—25.
- [10] XIE X H, CHEN G Y, SHANG X D, et al. Evolution of the semidiurnal ( $M_2$ ) internal tide on the continental slop of the northern South China Sea[J]. Geophys Res Lett, 2008, 35, L13604. doi: 10. 1029/2008GL034179.
- [11] GONELLA, J. A rotary-component method for analyzing meteorological and oceanographic vector time series [J]. Deep Sea Res, 1972, 19: 833—846.
- [12] FANG W D, SHI P, LONG X M, et al. Internal solitons in the northern South China Sea from in-situ observations[J]. Chinese Science Bullin, 2006, 50: 1627—1631.
- [13] GARRETT C, MUNK W. Space-time scales of internal waves: A progress report[J]. J Geophys Res, 1975, 80 (3): 291—297.