

南海对于台风伊布都响应的数值计算^{*}

崔 红^{1 2)} 张文书³⁾† 王庆业³⁾

1) 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

3) 广东海洋大学海洋与气象学院, 南海海洋环境研究所, 湛江 524088)

(2009 年 1 月 15 日收到, 2009 年 4 月 1 日收到修改稿)

采用 POM 模式研究了南海对于台风伊布都的响应过程. 结果表明: 台风过后, 海洋表面温度下降 2—6 °C, 且在台风路径两侧不对称, 具有明显的右偏性. 受台风强混合作用的影响, 混合层加深 10—60 m, 上混合层热量损失约 824.78 W/m², 其中垂向混合是造成热量损失的主导动力因素. 由于受上混合层热通量输送的影响, 混合层以下附近水层处于增温状态, 海水温度做近惯性波动. 同时, 台风还能引起强烈的近惯性流, 最大流速出现在上混合层, 可达 1.4 m/s.

关键词: 南海, 台风, 上层海洋, 近惯性波动

PACC: 9210F, 9210D, 9210K, 9210L

1. 引 言

台风是海洋上的突变天气过程, 是海气相互作用最为直观的表现形式. 台风产生的海面气旋式风应力以及强烈的混合过程^[1], 对上层海洋与深层海水之间的热量、能量和物质输运产生重大影响^[2-4], 因此海洋对于台风过程的响应特征一直被许多学者所关注.

关于海洋对于台风的响应的研究, 早在上世纪五六十年代, Fisher^[5]和 Leipper^[6]分别通过船测数据发现台风过后 SST 下降 3 °C 和 6 °C. Price^[7]分析浮标数据以及 Cornillon 等^[8]分析卫星数据均发现 SST 的下降具有右偏性. Dickey 等^[9]和 Zelder 等^[10]分析了浮标数据得出了台风过后不同水深的温度响应不同的结论. Shay 等^[11]、Zheng 等^[12]通过台风期间的流速观测数据分析了流场对于台风的响应过程, 并着重分析了近惯性振荡现象. 然而, 由于台风过程中现场观测的实际困难, 数值模拟成为海洋学家研究海洋对于台风过程的响应的重要手段^[13-15].

我国对于台风过程中海洋的响应的研究起步较晚, 研究相对较少. 许东峰等^[16]、Liu 等^[17]分别利用 Argo 资料分析了西北太平洋对于台风的响应. 朱建

荣等^[18]通过二层非线性海洋模式模拟了海洋对于台风的响应. 黄立文等^[19]用三维河口模式模拟了黄东海对于台风的响应.

南海地处低纬, 台风活动频繁, 研究南海对于台风过程的响应具有非常重要的科学意义. 但是, 由于台风过程中现场观测资料稀少, 迄今为止, 人们对于南海上层海洋对于台风的响应机理仍缺乏基本认识. 目前, 仅有 Chu 等^[20]以及李东辉和张铭^[21]做了这一方面的研究工作. 前者利用模式计算了南海对于热带气旋 Erinie 的响应; 后者用三维斜压海洋模式研究了南海对于强热带风暴 Frankie 的响应, 但也只考虑了上层流场的响应.

本文针对南海一典型台风过程伊布都 (Imbudo), 考虑真实的南海地形和海岸线, 采用三维斜压原始方程海洋模式 POM 模拟计算了南海对于台风的响应, 主要分析了温度、混合层以及流场等的响应, 得出了一些非常有价值的定量结果, 并对上层海洋对于台风的响应机理进行了分析.

2. 模式计算

2.1. 模式配置

POM 模式的计算区域为 1—25 °N, 99—124 °E,

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 40806012 和 40876013)、广东省教育厅人才引进专项(批准号: [2008]278)和广东省自然科学基金重点基金(批准号: 9252408801000001)资助的课题.

† 通讯联系人 E-mail: zhangsw@gdou.edu.cn

包括了整个南海区域和泰国湾. 水平空间分辨率为 $1/12^\circ \times 1/12^\circ$ 地形取自 ETOPO5 全球海底地形资料, 并且在模式计算中按照以下公式^[22]进行平滑:

$$\frac{|H_{i+1} - H_i|}{H_{i+1} + H_i} \leq \alpha, \quad (1)$$

式中 H_{i+1} 和 H_i 是相邻的两个网格点的水深, α 是平滑因子, 取值为 0.4.

在垂直方向上, 模式采用不等间隔的 16 个分层, 在海洋上层具有较高的分辨率. 模式的最小水深设为 5 m, 为提高上层海洋的分辨能力将最大水深截断为 3000 m.

2.2. 模式计算

模式计算分为两个阶段.

2.2.1. 建立模式平衡态

在海表面利用风场和热通量进行驱动, 其中风场数据采用 Hellerman&Rosenstein 提供的气候态月平均资料, 热通量采用空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 COADS 月平均统计值, 并在热通量中加入了简单的大气反馈项进行修正^[23]:

$$Q = Q_c + \left(\frac{dQ}{dT} \right)_c (T_c^0 - T^0), \quad (2)$$

式中, 下标 c 表示 COADS 数据, T^0 表示模式计算的海表温度.

取 Levitus94 资料中的冬季温盐数据作为模式的初始温盐场, 开边界条件利用全球模拟结果^[24]进行嵌套. 模式从 1 月份开始计算 3 年零 6 个月, 此时模式早已达到稳定, 并且已经能真实的模拟出 7 月初的海况.

2.2.2. 台风期间南海的响应

以第一阶段积分结果作为初始场, 采用时间间隔为 6 h 的 QSCAT/NCEP 的 2003 年 7 月份风场进行驱动, 计算一个月, 研究南海对于台风伊布都的响应.

3. 台风伊布都简介

0307 号台风伊布都(Imbudo)于 2003 年 7 月 16 日在关岛以南约 700 km 处发展为一个热带低气压, 它一直持续往西北偏北方向移动, 于 17 日加强为热带风暴. 7 月 19 日进一步增强为强热带风暴后, 20 日凌晨增至为台风级. 伊布都在 22 日越过菲律宾后进入南海时风速达 45—50 m/s, 进入南海后继续向西北偏西移动, 24 日上午 10 时在广东阳江到电白

一带沿海登陆, 登陆时最大风力达到了 12 级. 伊布都登陆后继续西行并减弱, 25 日早晨减弱为热带风暴, 之后在广西消散. 伊布都在接近香港、海南、广东及广西期间造成了严重经济损失. 图 1 给出了台风伊布都的路径图, 图 2 给出了 22 日 12 时至 23 日 06 时的 QSCAT/NCEP 台风风场.

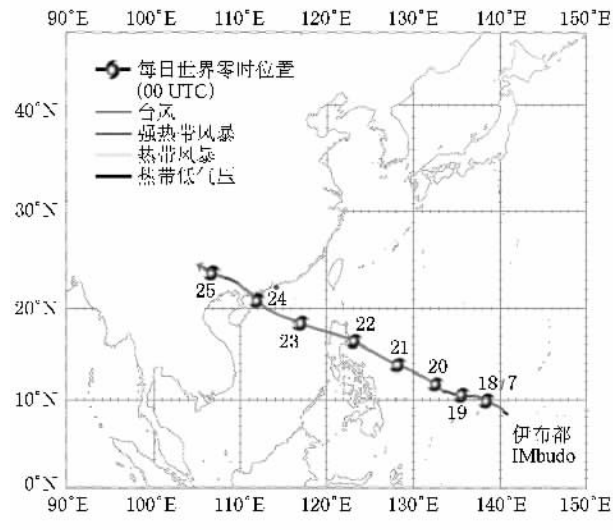


图 1 0307 号台风伊布都的路径图

4. 结果与讨论

4.1. SST 下降

为了验证 POM 模式计算的结果, 在台风路径左右侧各任取一点 (114°E , 17.75°N), (118°E , 19.75°N) 图 3 分别给出了模拟的日平均的 SST 与 AVHRR 遥感 SST 的比较. 图 3 中虚线表示 AVHRR 观测值, 实线表示 POM 模拟值. 由图 3 可以看出, POM 模式很好地模拟了台风前后 SST 随时间的变化.

用台风过后的 SST 减去台风作用于南海前 7 月 21 日的日平均 SST, 研究台风对南海 SST 的影响. 图 4 给出了 22 日到 24 日时间间隔为 12 h 的 SST 变化. 由图 4 可以看出, 随着台风的移动, 导致大面积的 SST 下降 2—6 $^\circ\text{C}$, 且台风路径右侧 SST 下降的范围和幅值都远远高于路径左侧, 具有明显的右偏性, 这一结论与 Price^[7]和 Comillon 等^[8]观测结果相一致. 台风过程中台风风应力在上层海洋造成的强烈垂向混合作用, 以及混合层底部流速剪切所引起的夹卷和抽吸作用使下层较冷的水体进入混合层, 是造成 SST 下降的主要原因. 台风过程中, 台风风应力驱动

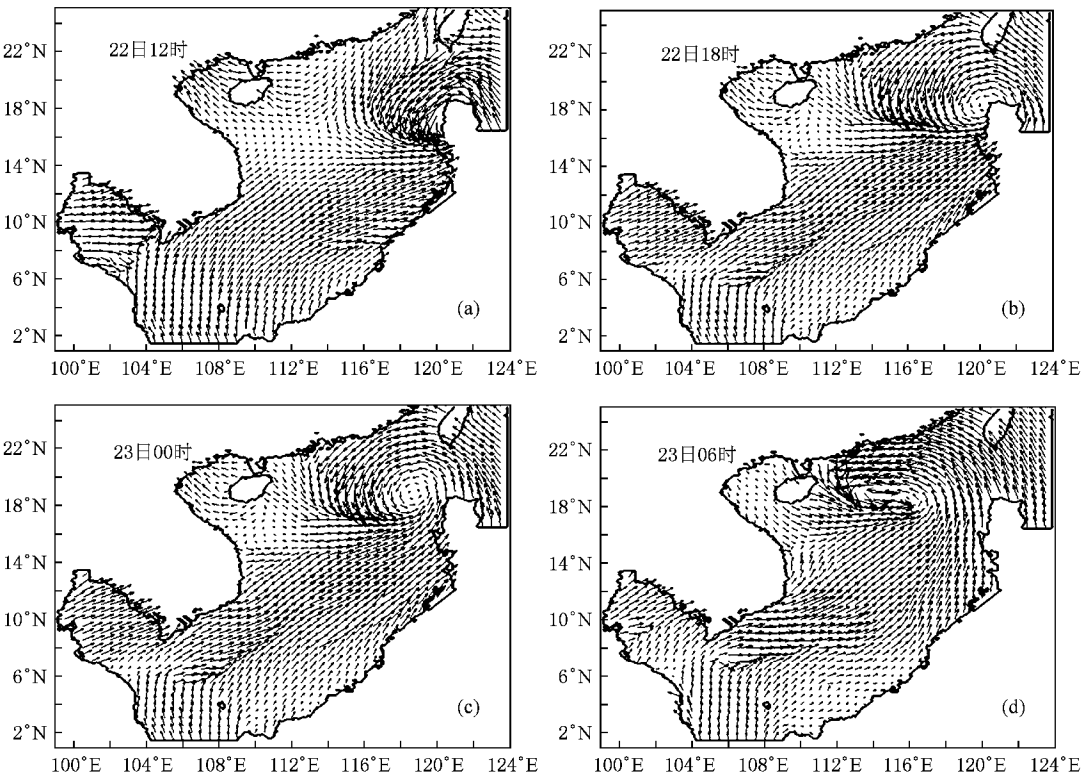


图 2 南海海面风场 (a)7月22日12时 (b)7月22日18时 (c)7月23日00时 (d)7月23日06时

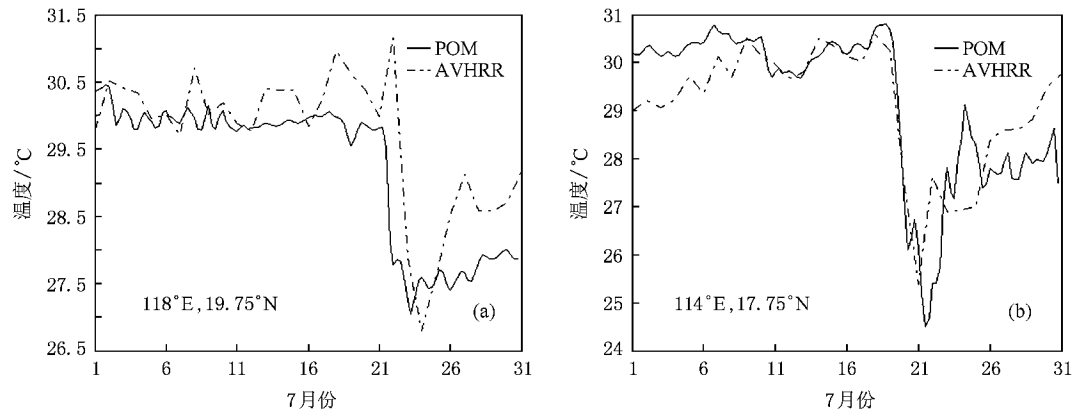


图 3 POM 模拟值与 AVHRR 观测值的比较 (a)台风右侧点(118°E,19.75°N);(b)台风左侧点(114°E,17.75°N)

的非地转运动在混合层底的辐聚过程诱导产生顺时针旋转的近惯性振荡.在台风路径的右侧,风应力随时间变化做顺时针旋转,与近惯性流速方向一致,对流速的发展起促进作用,而在台风路径的左侧,风应力逆时针旋转,与近惯性流速方向相反,抑制流速的发展.因此,台风路径右侧的混合层流速要远大于左侧,大的流速必然要造成强的夹卷和抽吸作用,进而导致台风路径右侧的 SST 响应大于台风路径左侧.

4.2. 不同水深温度的响应不同

图 5 给出了图 3 中台风右侧点(118°E, 19.75°N)不同水深处的温度以及混合层深度(MLD)的时间变化序列.图 5(a)中,从上到下依次对应水深 $h = 14, 28, 55, 110$ m 处的海水温度,可以看出台风过后 14 m 处水温下降 3℃左右,28 m 处水温升高 2℃左右,而 55 m 和 110 m 水深处,温度都是做近

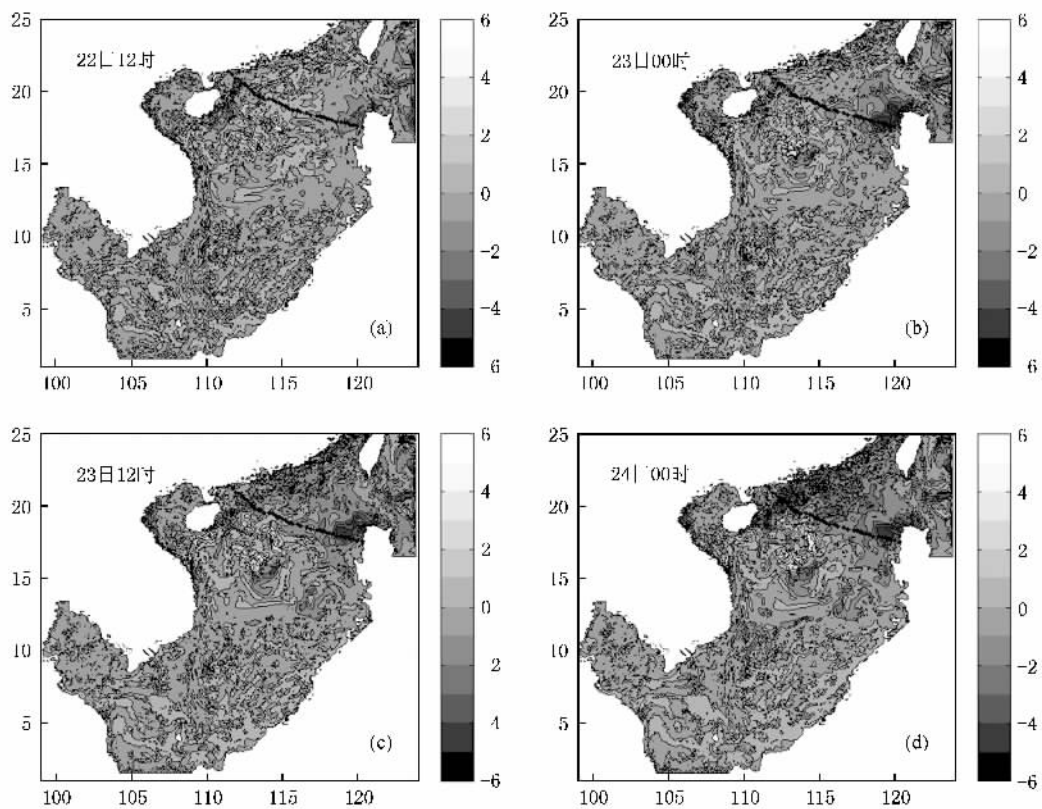


图 4 相对于台风作用前 7 月 21 日的 SST 变化($^{\circ}\text{C}$) (a)7 月 22 日 12 时 (b)7 月 23 日 00 时 (c)7 月 23 日 12 时 (d)7 月 24 日 00 时

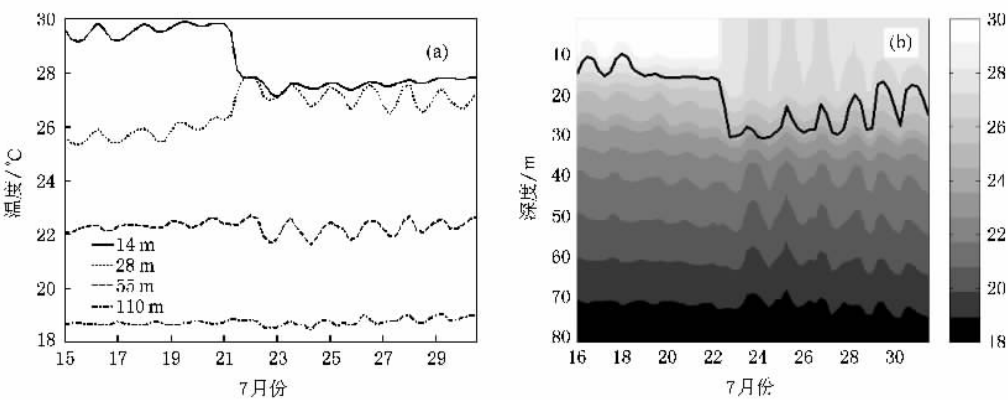


图 5 7 月份 (a) 不同水深温度随时间的变化序列 (b) 混合层深度随时间的变化序列

惯性波动. 这与 Dickey 等^[9]和 Zelder 等^[10]在飓风 Felix 经过 Bermuda 时, 浮标观测的不同水深海洋温度的响应相一致. 由图 5(b) 可以看出, 14 m 水深在台风后是处于混合层以内, 台风过程中混合层底部流速剪切非常大, 使下层的冷水夹卷到混合层, 从而造成了混合层温度的下降. 台风过程中海水的近惯性振荡, 把混合层的热量和能量向上传输, 使混合层下面 28 m 水深处温度上升, 但是, 随着水深的加深,

能量耗散加剧, 所以在 55 m 和 110 m 处, 温度没有明显的增高, 只是做近惯性波动.

4.3. 混合层加深

取 7 月 21 日的日平均混合层深度作为台风作用前的混合层深度, 7 月 24 日的日平均混合层深度作为台风作用后的混合层深度, 研究台风前后混合层的变化, 如图 6 所示, 负值表示混合层的加深. 由

图 6 可知 ,台风导致大面积的混合层深度的加深 ,最大可达约 60 m ,且在台风路径右侧 ,混合层加深的幅值和范围要远远大于左侧 ,具有明显的右偏性 .混合层加深以及右偏性的机理与 4.1 中 SST 下降以及右偏性机理相同 ,此处不再赘述 .

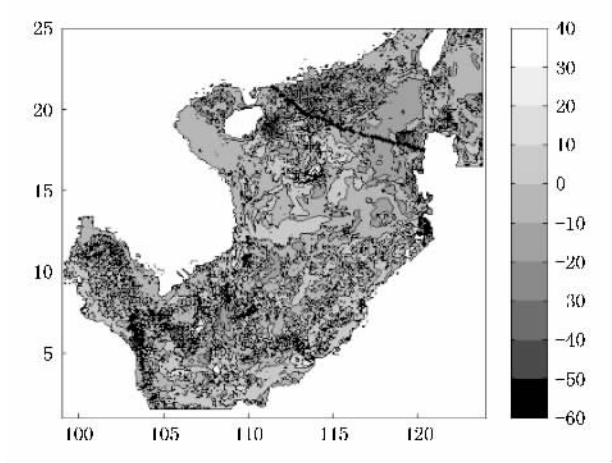


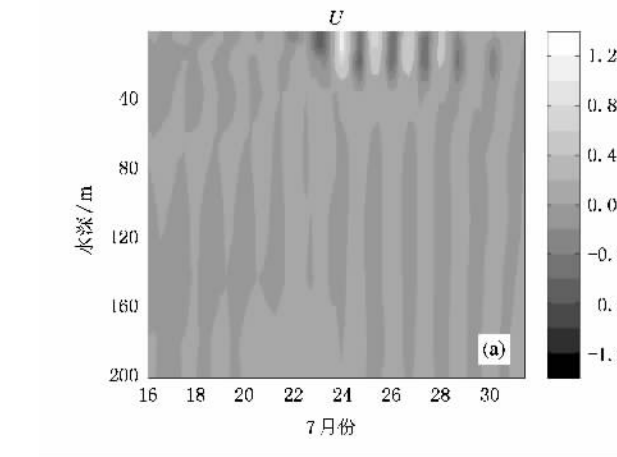
图 6 台风前后混合层深度的变化(m)

4.4. 混合层热通量的泵吸效应

由图 4 和图 6 可知 ,7 月 24 日台风过后 ,SST 的下降最大以及混合层深度加深最深都集中于 112—114 °E ,19.25—21.25 °N 区域 .下面计算这一区域台风前后混合层内的热收支 ,并且通过计算分析导致 SST 下降的主要动力因素 .

POM 模式中的热传导方程如下 :

$$\frac{\partial TD}{\partial t} = - \frac{\partial Tw}{\partial \sigma} - \frac{\partial TUD}{\partial x} - \frac{\partial TVD}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right] + F_T - \frac{\partial R}{\partial z} . \quad (3)$$



为了简化计算 ,假设海面是刚盖的 ,即 $\eta = 0$,并且水的密度和比热均为常数 ,即 $\rho c_p = 4.18 \text{ MJ} / (^\circ\text{C} \cdot \text{m}^3)$ (3) 式左右两边同时乘以系数 ρc_p ,并且在混合层深度内进行垂向积分 ,得到以下公式 :

$$Q_T = - Q_W - Q_{U+V} + Q_{DV} + Q_{DH} - Q_S , \quad (4)$$

(4) 式中 , Q_W 为垂直对流项 ,对应 (3) 式右边第一项 ; Q_{U+V} 为水平对流项 ,对应 (3) 式右边第二和第三项 ; Q_{DV} 为垂向混合项 ,对应 (3) 式右边第四项 ; Q_{DH} 为水平扩散项 ,对应 (3) 式右边第五项 ; Q_S 为表面热通量 ,对应 (3) 式中右边最后一项 .

一般认为 ,水平扩散项 Q_{DH} 数值非常小^[15] ,在计算的过程中 ,可将此项忽略不计 .表面热通量只在海表面 $\eta = 0$ 时有值 ,在其他深度上等于 0 ,所以该项在混合层内积分等于 0 .表 1 给出了台风前后 (24 日减去 21 日) 混合层内的热收支的变化以及各动力项所占的百分比 .由表 1 可以看出 ,垂向混合是台风前后热收支减少的主导因素 ,占 66.56% ,水平和垂向对流作用相对较弱 ,程度接近 ,分别为 19.16% 和 14.28% .

表 1 台风前后各项热收支变化

动力因素	数值大小/ Wm^{-2}	百分比/%
Q_T	824.78	100
Q_W	117.76	14.28
Q_{U+V}	158.03	19.16
Q_{DV}	548.99	66.56

4.5. 近惯性波动

图 7 给出了台风右侧一点 (117 °E ,21 °N) 从

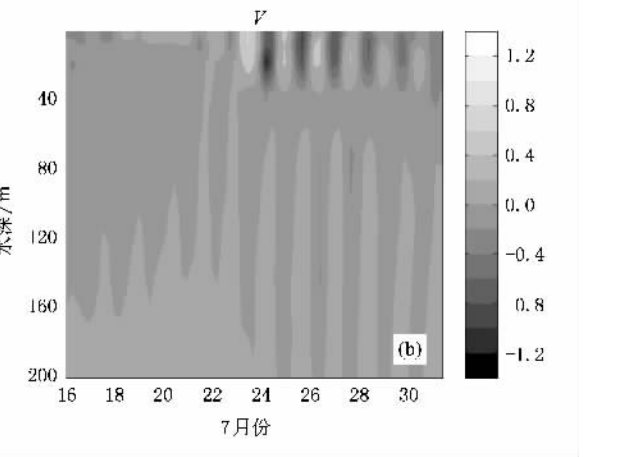


图 7 (117 °E ,21 °N) 处从 7 月 16 日至 31 日 (a) 流速 u 的时间变化序列 (b) 流速 v 的时间变化序列(单位 : m/s)

7月16日至31日 0—200 m 水深内速度 u 和 v 的时间变化序列.由图可以看出,在7月23日台风过后,流速开始做近惯性波动.从幅值上看,随着深度的加深,流速减弱,最大流速出现在上混合层,可达 1.4 m/s.从相位上看,混合层内流速与深层流速方向反向.对流速 u 和 v 分别做功率密度谱分析,如图8所示,可以得出近惯性波动的频率为 0.688,对应周期为 1.45 天,略大于当地的惯性振荡周期 1.39 天,与 Chu 等^[20]模拟结果一致.

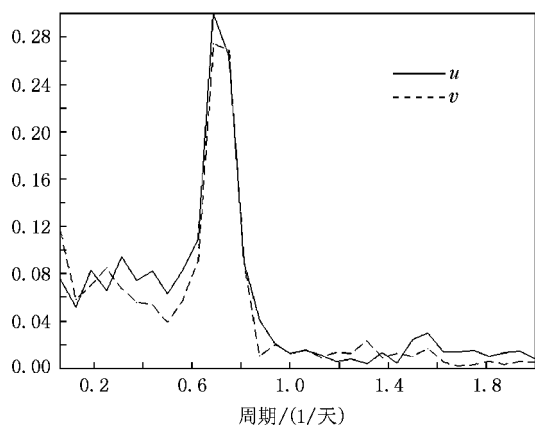


图8 流速 u 和 v 的功率密度谱

5. 结 论

本文用 POM 模式模拟计算了 2003 年 7 月台风伊布都期间南海的响应,结果显示:

1. 台风风应力引起强烈的垂向混合作用,以及混合层底部流速剪切所引起的抽吸和夹卷作用,使海表面温度下降 2—6 °C,混合层加深 10—60 m,且都具有明显的右偏性.即台风路径右侧, SST 下降以及混合层加深的幅值和范围要远大于左侧.

2. 不同水深海水的温度响应也不同.混合层温度下降,混合层以下附近水层温度上升,而深层海水温度做近惯性波动.

3. 台风过后,混合层内的热收支损失达 824.78 W/m².对每一项动力因素造成的热损失分别进行了计算,结果显示垂向混合起主导作用,占 66.56%,水平和垂向对流作用相对较弱,程度接近,分别为 19.16% 和 14.28%.

4. 台风过后,近惯性波动向下传播能够达到很深的距离.从幅值上看,随着深度的加深,流速减弱;从相位上看,混合层内流速与深层流速方向反向.流速的功率密度谱分析得出,近惯性波动的周期略大于当地的惯性振荡周期.

- [1] Huang S, Cai Q, Xiang J, Zhang M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3202 (in Chinese) [黄思训、蔡其发、项杰、张铭 2007 物理学报 **56** 3202]
- [2] Walker N D, Leben R R, Balasubramanian S 2005 *Geophys. Res. Lett.* **32** doi :10.1029/2005GL023716
- [3] Mo J, Lin Y, Lin W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3971 (in Chinese) [莫嘉琪、林一骅、林万涛 2005 物理学报 **54** 3971]
- [4] Sriv S L, Huber M 2007 *Nature* **447** 577
- [5] Fisher E L 1958 *J. Meteor.* **15** 328
- [6] Leipper D F 1967 *J. Atmos. Sci.* **24** 182
- [7] Price J F 1981 *J. Phys. Oceanogr.* **11** 153
- [8] Cornillon P, Stramma L, Price J F 1987 *Nature* **326** 373
- [9] Dickey T, Frye D, McNeil J, Manov D, Nelson N, Sigurdson D, Jannasch H, Siegel D, Michaels T, Johnson R 1998 *Mon. Weather. Rev.* **126** 1195
- [10] Zelder S E, Dickey T D, Doney S C, Price J F, Yu X, Mellor G L 2002 *J. Geophys. Res.* **107** doi :10.1029/2001JC000969
- [11] Shay L K, Elsberry R L 1987 *J. Phys. Oceanogr.* **17** 1249
- [12] Zheng Q, Lai R J, Huang N E, Huang N E, Pan J, Liu W T 2006 *Acta. Oceanol. Sin.* **25** 1
- [13] Hong C H, Yoon J H 2003 *J. Geophys. Res.* **108** doi :10.1029/

2002JC001563

- [14] Morey S L, Bourassa M A, Dukhovskoy D S, O'Brien J J 2006 *Ocean Dynamics.* **56** 594
- [15] Prasad T G, Hogan P J 2007 *J. Geophys. Res.* **112** doi :10.1029/2007JC003695
- [16] Xu D, Liu Z, Xu X, Xu J 2005 *Acta. Oceanol. Sin.* **27** 1 (in Chinese) [许东峰、刘增宏、徐晓华、许建平 2005 海洋学报 **27** 1]
- [17] Liu Z, Xu J, Zhu B et al 2007 *Chin. J. Oceanol. Limnol.* **25** 123
- [18] Zhu J, Qin Z 1995 *Oceanologia et Limnologia Sinica* **26** 146 (in Chinese) [朱建荣、秦曾颢 1995 海洋与湖沼 **26** 146]
- [19] Huang L, Deng J 2007 *Oceanologia et Limnologia Sinica* **38** 246 (in Chinese) [黄立文、邓健 2007 海洋与湖沼 **38** 246]
- [20] Chu P C, Veneziano J M, Fan C, Carron M J, Liu W T 2000 *J. Geophys. Res.* **105** 13991
- [21] Li D, Zhang M 2003 *Marine Forecasts* **20** 56 (in Chinese) [李东辉、张铭 2003 海洋预报 **20** 56]
- [22] Mellor G L, Ezer T, Oey L Y 1994 *J. Atmos. Oceanic. Technol.* **11** 1120
- [23] Honey R L 1971 *J. Phys. Oceanogr.* **1** 241
- [24] Xia C, Qiao F, Zhang M, Yang Y, Yuan Y 2004 *J. Oceanol. Limnol.* **22** 292

Numerical calculation of the response of the south China sea to typhoon imbudo^{*}

Cui Hong^{1,2)} Zhang Shu-Wen^{3)†} Wang Qing-Ye³⁾

¹ *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*

² *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

³ *South China Sea Environmental Institute, College of Oceanology and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China*

(Received 15 January 2009 ; revised manuscript received 1 April 2009)

Abstract

The response of the South China Sea (SCS) to Typhoon Imbudo was examined using POM model. The results indicated that SST decreased by 2—6 °C with a rightward-biased response as Typhoon Imbudo passed across the SCS. Due to a strong mixing process, the mixed layer (ML) depth deepened as much as 10—60 m and ML heat budget lost 824.78 W/m², which was dominated by the vertical mixing. By the response of upper ML heat transport, the temperature below the ML increased and oscillated near the inertial period. Furthermore, strong inertial currents were generated by the storm with the max currents up to 1.4 m/s in the upper ML.

Keywords : SCS, typhoon, upper ocean, inertial oscillation

PACC : 9210F, 9210D, 9210K, 9210L

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40806012 and 40876013), the Specialized Research Fund for Talent of Education Bureau of Guangdong Province, China (Grant No. [2008] 278), and the Key Program of the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 9252408801000001).

[†] Corresponding author. E-mail : zhangsw@gdou.edu.cn