

# 台湾东北部地形共振对 M2 内潮演化影响的数值模拟研究

畅 航<sup>1</sup>, 曹圣山<sup>1</sup>, 徐振华<sup>2,3</sup>, 尹宝树<sup>2,3,4</sup>

(1. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 2. 中国科学院 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术国家海洋实验室, 山东 青岛 266200; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 正压潮流、突变海底地形和稳定层结结构是内潮生成的主要因素。台湾东北部海域地形结构多变, 正压潮流较强, 形成复杂的内潮场。本文通过 ROMS(Regional Ocean Modeling System)模式, 研究了台湾东北部海域两源区共振条件下内潮的生成、传播和耗散混合过程。结果表明: 在台湾东北部海域, Mien-Hua 海底峡谷与 I-lan 海脊是 M2 内潮重要的生成源区, 源区之间的距离与 M2 内潮水平波长相当, 满足共振条件并增强了内潮的生成和耗散。本文通过敏感性试验, 探讨模式水平分辨率与不同季节的层化对源区共振过程的影响, 数值实验表明, 高分辨率的数值模式可以更好地刻画小尺度的地形结构, 对复杂地形条件下内潮生成和传播过程的数值模拟十分必要; 不同季节的海水层化结构在本质上不改变两源区间的共振关系, 但层化强弱对内潮能量的生成具有一定程度的影响。

**关键词:** 台湾东北部; 内潮; ROMS(Regional Ocean Modeling System); 共振

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)10-0094-08

DOI: 10.11759/hyxx20170502001

在密度稳定的层化海洋中, 当天文潮流经变化的海底地形时, 海水的扰动将能量从正压场转移到斜压场, 此类过程发生在海洋内部, 因之称为内潮或斜压潮。内潮发生在海洋内部, 并广泛地分布于全球的海洋<sup>[1]</sup>。一方面, 内潮引起全水层海洋等密度面的起伏会影响到海洋内部声信号的传播, 增加了水下通讯和目标观测的困难<sup>[2]</sup>。另一方面, 内潮的传播对海洋垂向各尺度过程的串联、能量的传递以及维持全球的热盐环流具有不可忽视的作用<sup>[3]</sup>。内潮在开阔海域可以进行长距离传播, 洋中脊、岛链、海山等源区生成的能量可以传播到陆架坡区, 并在陆架坡附近引起剪切不稳定流, 最终引发内潮的耗散, 其耗散过程对营养物质的输送, 温盐层结的变化具有重要的意义<sup>[4]</sup>。

目前对内潮的研究方式主要通过现场观测、卫星资料和数值模拟。三种方法对内潮生成、传播和耗散过程的认知相得益彰; 现场观测数据最为直观, 但是通常覆盖范围有限, 并且耗资较大<sup>[5]</sup>。卫星遥感可以通过全球海表面高度计资料研究内潮, 覆盖的范围较广, 但其缺陷在于仅能提取海洋表层的信号<sup>[6]</sup>。通过数值模拟研究内潮的花费较少且简单易行, 采用理想实验或是实际模型可以深入了解内潮的结构特征, 更好地估计内潮的能量系统, 但模式运行结果需要通过观测和卫星数据验证<sup>[7-12]</sup>。

台湾岛东北部海域水深变化剧烈, 北侧的东海陆架坡, 东北部的 Mien-Hua 海底峡谷, 以及南侧的 I-lan 海脊构成主要地形结构<sup>[13-14]</sup>(图 1)。现场观测资料对研究范围具有局限性, 卫星观测难以获取海洋深层的详细信息, 数值模式是研究台湾东北部内潮的有效手段。Niwa<sup>[7]</sup>通过 POM(Princeton Ocean Model)模式模拟了东中国海(包含吕宋海峡)M2 内潮的生成传播特征, 指出台湾岛东北部是半日内潮的重要源区。然而, 对台湾东北部海域小尺度地形结构的刻画、地形对内潮传播的影响、以及源区之间是否存在共振的关系迄今并未有研究进行详细探讨。

收稿日期: 2017-05-02; 修回日期: 2017-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41528601, 41376029, U1406401, 41421005); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA10020104, XDA10020101); 中国科学院青年创新促进会资助项目; 中国科学院创新交叉团队资助项目; 中国科学院前沿科学重点项目

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41528601, No.41376029, No.U1406401, No.41421005; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Science, No.XDA10020104, No.XDA10020101; Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences; Interdisciplinary Innovation Team of the Chinese Academy of Sciences; Key Research Program of Frontier Sciences, the Chinese Academy of Sciences]

作者简介: 畅航(1991-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士, 研究方向为数学模型及其数值解法, 内潮、内波数值模拟, 电话: 0532-82898932, E-mail: justintimberwind@126.com; 曹圣山, 通信作者, 教授, 主要从事数学模型及其数值解法, 电话: 0532-66787052, E-mail: sscao@ouc.edu.cn

本文主要通过区域海洋模式 ROMS(Regional Ocean Modeling System)<sup>[15]</sup>讨论台湾东北部海域两个主要

源区是否存在共振关系, 以及共振对内潮生成演化、耗散和混合方面的影响。

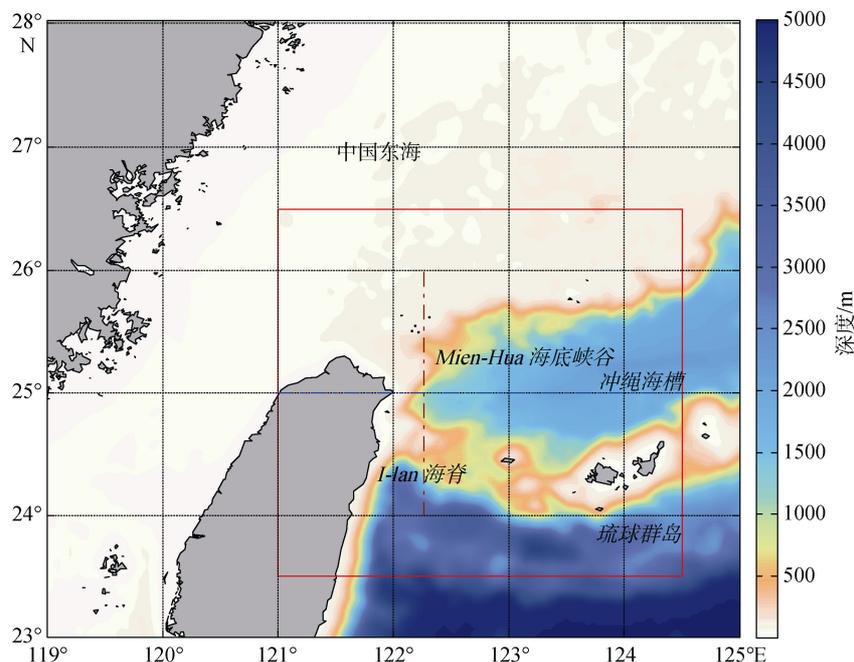


图 1 台湾东北部海域地形图

Fig. 1 Bathymetry map northeast of Taiwan and the surrounding ocean

本文第 1 部分介绍 ROMS 模式的模型驱动和敏感性实验设置, 第 2 部分探讨模式模拟结果及分析, 第 3 部分为得到的结论和今后的研究展望。

## 1 实验方案

本文模拟的区域选择如图 1 所示, 经度范围为 121°~124.5°E, 纬度范围为 23.5°~26.5°N, 覆盖了在台湾东北部海域半日内潮传播的主要源区。模拟区域的主要地形特征包括陆架坡、海底峡谷、海脊和海

岛等。模式选取的地形数据取自 General Bathymetric Chart of the Oceans 水深资料。本文主要分析 122.25°E (图 1 棕色虚线)的二维经向断面, 通过模式输出结果研究两源区的共振关系, 以及在共振条件下内潮的生成传播特征。由于本文的研究目标主要集中于 3 000 m 水深以浅, 模式将最大水深设为 3 000 m。图 2 显示了本文研究的经向断面, 其中 24.5°N 附近的凸起地形为台湾东北部海域南侧的 I-lan 海脊, 25.4°N 附近的下凹地形为北侧的 Mien-Hua 海底峡谷。

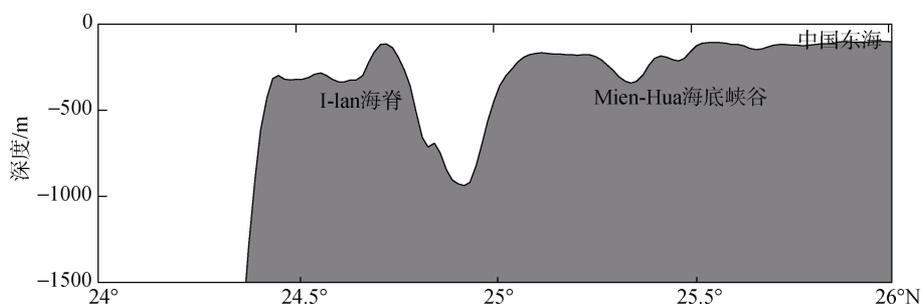


图 2 二维断面地形图

Fig. 2 Model-generated vertical topography

本文的参照实验 A 的初始场设置如图 3 中的蓝线所示, 温盐数据选取研究海域(121°~124.5°E, 23.5°~

26.5°N)的 World Ocean Atlas 2005(WOA05)年平均资料。模式垂向取 50 个  $\sigma$  层, 并对上层 200 m 深度加密。

开边界条件取自 TPXO7.2, 并在网格边界选取 10 个网格点作为海绵层, 以减少内潮在边界的反射。模式

运行 10 d, 计算的时间步长设为 90 s, 对数值模式最后两天的输出结果进行分析。

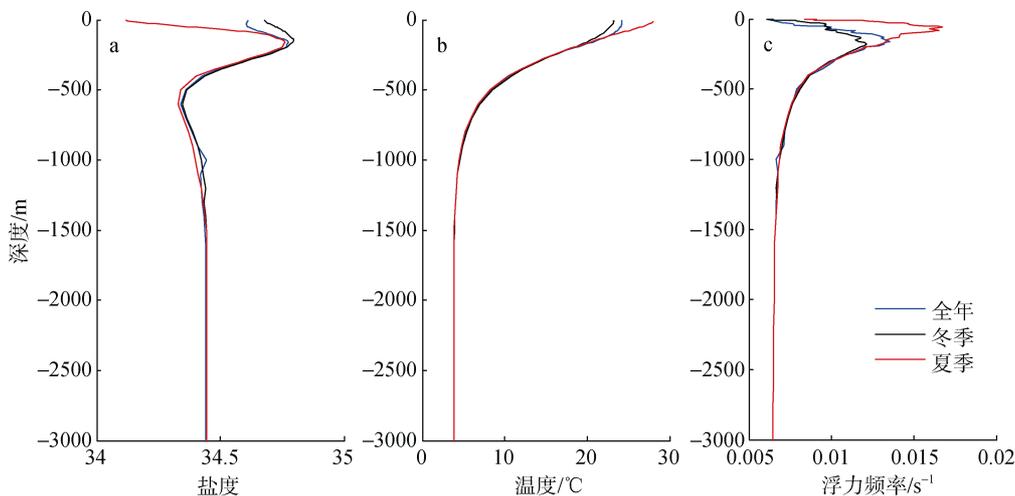


图 3 盐度(a)、温度(b)和浮力频率(c)的垂直剖面图

Fig. 3 Densities, temperatures, and thermoclines in various model cases

为探讨 I-lan 海脊与 Mien-Hua 海底峡谷两个内潮源区是否共振, 本文设置两组对比实验 B1 和 B2, 对模拟海域的源区共振进行验证。将 25°N 设置为南北两源区的截断面(图 1 蓝色虚线), 为去除海脊对内潮生成传播的影响, 实验 B1 仅包含北侧海底峡谷; 同理, 实验 B2 仅将南侧海脊作为内潮的生成源。为

减少边界误差对实验的影响, 将实验 A 在 25°N 断面的模式输出结果作为 B1 与 B2 的开边界条件。

同时, 本文通过敏感性实验, 分析其他条件对内潮生成传播的影响(表 1)。其中 C1 与 C2 探讨水平分辨率对源区共振的影响, D1 与 D2 探讨不同季节的跃层对源区共振的影响(图 3 红线与黑线)。

表 1 敏感性实验中地形结构、层结变化和水平分辨率的设置

Tab.1 Topographies, horizontal resolutions, and thermoclines predicted by model cases

实验	Mien-Hua 峡谷	I-lan 海脊	层结选取	水平分辨率(°)
A	是	是	年平均跃层	1/60
B1	是	否	年平均跃层	1/60
B2	否	是	年平均跃层	1/60
C1	是	是	年平均跃层	1/30
C2	是	是	年平均跃层	1/90
D1	是	是	夏季跃层	1/60
D2	是	是	冬季跃层	1/60

## 2 模式结果及分析

### 2.1 内潮的生成和传播过程

内潮生成后, 沿着水平夹角  $c = \left( \frac{\sigma^2 - f^2}{N^2 - \sigma^2} \right)^{1/2}$  的射

线路径辐射。 $f$  是对应纬度的惯性频率,  $f = \sin(\Phi)/12$  cph, 其中,  $\sigma$  是内潮的频率,  $\Phi$  是地球的纬度,  $N$  是

Brunt-Vaisala 频率,  $N = [(g/\rho)(\partial\rho/\partial z)]^{1/2}$ 。当  $(dh/dx)/c = 1$  时, 地形为临界条件(图 4a 黑色虚线), 当  $(dh/dx)/c > 1$  时为超临界地形条件,  $(dh/dx)/c < 1$  为亚临界地形条件。内潮能量转化率的计算式为:  $C = \rho' g W^{1[6]}$ 。式中  $\rho'$  是扰动密度,  $W$  的计算为  $W = -\nabla_H \cdot [(D+z)U]$ 。并在每个网格点对潮周期平均的能量转化率进行垂向积分。

图 4 为参照实验 A 二维断面的地形临界性判别

以及潮周期平均垂向积分的能量转化率空间分布。二维断面 M2 内潮的生成源主要集中在地形变化剧烈的两个重要的特殊地形: Mien-Hua 海底峡谷和 I-lan 海脊。通过对 M2 内潮的特征角与地形坡度的计算可以看出, I-lan 海脊底部两侧与 Mien-Hua 峡谷的两侧对应超临界和临界地形, 内潮生成能量的多

模态叠加后, 以射线的形式从源区向外辐射。值得注意的是, 地形变化最为剧烈的区域为 I-lan 海脊的南侧(对应图 4 的 24.4°N 附近), 内潮生成的能量较强, 而能量最强的海域为海脊的北侧(对应图 4 的 24.8°N 附近), 地形坡度却较为平缓, 内潮在该海域生成能量的加强还存在着除地形条件外其他的影响因素。

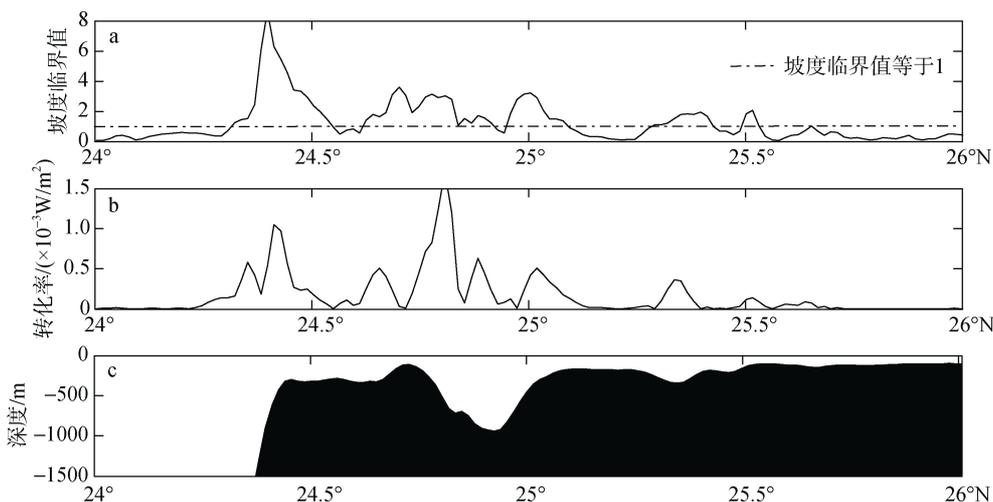


图 4 参照组 A 的断面地形临界性(a)、能量转化率(b)和地形(c)

Fig. 4 Bathymetric criticality (a), horizontal distributions of depth-integrated and period-averaged conversion rates (b) and depths (c) in case A

图 5 为实验 A 在二维断面上瞬时流速  $v$  的垂向分布图。从图 5 中可以看出, I-lan 海脊与 Mien-Hua 海底峡谷作为内潮生成的强源区, 存在着清晰向源区两侧传播的斜压射线结构。通过对两源区水平距离的计算, 二者相距约为 60 km。M2 内潮水平波长的计算方法为:  $\lambda_n = \frac{2\pi}{k_m}$ , 其中  $k_m$  为水平波数。计算得到 M2 内潮第一模态的水平波长约为 64 km, 由于内潮水平波长与地形距离相当, 两个源区间存在着共振关系。在吕宋海峡, 存在着高达流速 2 m/s 的正压潮和突变的双海脊地形, 同时由于双海脊的共振效应, 使得吕宋海峡成为全球最强的半日内潮生成源之一<sup>[17-19]</sup>。I-lan 海脊与 Mien-Hua 海底峡谷间的共振效应使得台湾东北部同样为中国近海重要的内潮生成海域。

对比实验 B1、B2 分别表示对 Mien-Hua 海底峡谷与 I-lan 海脊海域单独进行数值模拟, 为保证实验精确性, 其开边界驱动条件为参照组 A 对应时刻的输出结果, 并将参照组 A 与实验 B1、B2 能量转化率进行对比。当对 Mien-Hua 海底峡谷与 I-lan 海脊海域单独进行数值模拟时, 24.4°N 与 24.8°N 附近内潮

生成的能量存在着不同程度的减小(图 6), 而在 I-lan 海脊南侧与 Mien-Hua 海底峡谷的北侧, 内潮生成的能量基本变化不大。共振模态的内潮水平波长与地形距离相当, 内潮底层扰动压强的位相与地形相吻合, 由此共振模态从正压潮和地形的相互作用中发生能量的叠加, 对内潮能量具有增强效应。

## 2.2 内潮的耗散和混合过程

内潮能量的耗散值的计算方式为能量的转化率  $C$  减去能通量的辐射值  $\nabla_H F$ <sup>[16]</sup>。图 7 显示二维断面 M2 内潮耗散率。总体来说其分布态势与内潮转化率的分布类似, 但是内潮的散射伴随着多模态结构, 高模态的剪切不稳定性, 以及浅海区域频繁的潮地作用使得内潮的能量向小尺度转移, 所以内潮能量耗散的分布较内潮转化率的分布更加广泛。同时通过上一节对内潮传播的描述, Mien-Hua 海底峡谷与 I-lan 海脊的共振效应, 内潮能量发生进一步的模态转化, 使得海脊与峡谷成为能量的强耗散区域。

通过前文的叙述, 内潮能量耗散会对海洋的混合产生贡献, 通常通过垂向扩散系数  $k_v$  来表示海水的湍流混合程度。Munk 等<sup>[3]</sup>指出, 为了维持全球大洋层结稳定, 海水的密度扩散率量级平均应达到

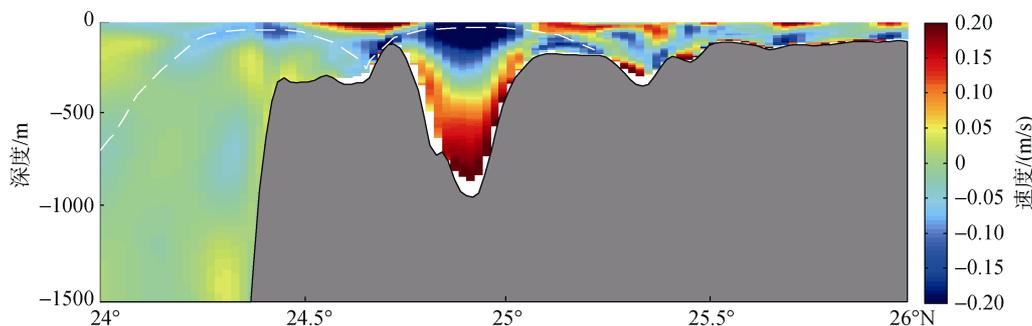


图 5 实验 A 中瞬时水平流速

Fig. 5 Instantaneous zonal velocity amplitude of internal tide in case A

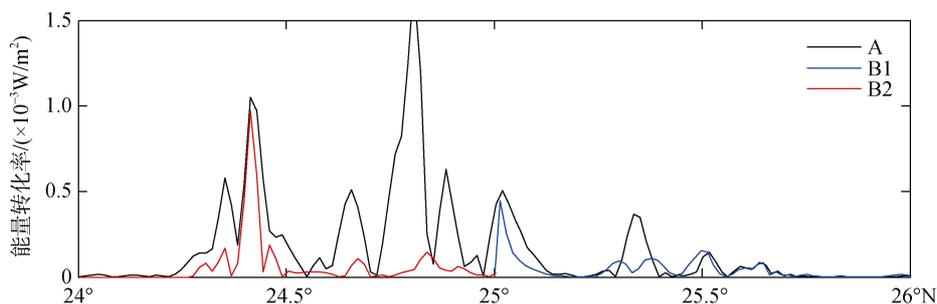


图 6 参照组 A 与实验 B1、B2 在断面的能量转化率分布

Fig. 6 Horizontal distribution of depth-integrated and period-averaged conversion rates in A, B1, and B2 cases

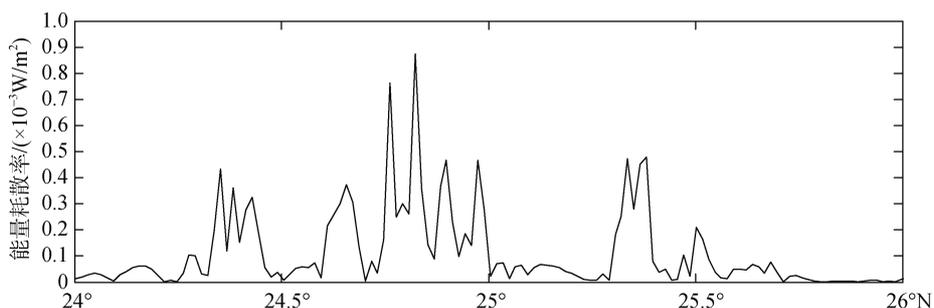


图 7 参照组 A 断面的能量耗散率分布

Fig. 7 Horizontal distribution of depth-integrated and period-averaged dissipation rates in case A

$10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ , Gregg 在 1989 年通过观测指出全球大洋中的背景垂向扩散系数约为  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ <sup>[20]</sup>, 而内潮生成源区附近的垂向扩散系数远高于  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

Osborn<sup>[21]</sup>最初通过参数化公式:  $k_v = \Gamma \frac{D}{N^2}$ , 估计了潮致混合的垂向扩散系数。St Laurent<sup>[22]</sup>在 Osborn 提出理论的基础上结合实际观测数据, 提出了 LSJ02 的改进方案, 将局地耗散率设为:  $D(q/\rho)CF(z)$ , 公式中的  $\Gamma$  为混合效率, 通常设为常数 0.2,  $D$  为局地能量的耗散值,  $C$  为潮周期平均的转化率。  $F(z)$  是耗散率的垂向分布函数, 并满足条件  $\int_d^0 F(z)dz = 1$ ,  $d$  是断面的海水深度,  $d < 0$ 。依据深海和

大陆坡附近的观测资料,  $F(z)$  近似表达为指数函数:  $F(z) = \frac{\exp[(z+d)/\zeta]}{\zeta[1-\exp(d/\zeta)]}$ , 其中  $\zeta$  用来表示垂向衰减比率, 通常设为常数 500。

在数值模拟中的背景垂向扩散系数设为  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , 并通过 LSJ02 方案计算垂向二维断面 M2 内潮的混合态势(图 8)。垂向断面的两个重要源区 Mien-Hua 海底峡谷和 I-lan 海脊的垂向扩散系数比水深较深处, 高出约 1~2 个量级。在 Mien-Hua 海底峡谷的底部是内潮混合较强的区域, 其垂向扩散系数可以达到  $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  的量级, 由于共振作用 I-lan 海脊的混合是研究海域中最强的区域, 其垂向扩散系数可以达到

$10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ 。因此，地形的共振对内潮引起的混合有重要的影响。

### 2.3 影响内潮共振效应的因素分析

为考察水平网格分辨率对地形共振条件下内潮生成和传播过程的影响，本文设计两组敏感性实验进行分析。图 9 中蓝色实线代表敏感性实验 C1，其数值模式的网格分辨率为  $1/30^\circ$ ；红色实线代表敏感性实验 C2，网格分辨率为  $1/90^\circ$ 。通过图 9 可以看出

内潮能量的转化率随着网格精度的增加而增大，当分辨率精度增加时，地形的共振效应仍然存在。但是当分辨率变低时，断面的一些小尺度地形结构发生变化，使得内潮的生成分布发生了改变；并由于水平分辨率变低，源区间的距离发生了改变，地形的共振效应减弱；在模式稳定的基础上，当水平分辨率达到一定精度时，内潮的转化率增加的幅度将趋于稳定，水平分辨率的变化引起内潮转化率的改变不超过 10%。

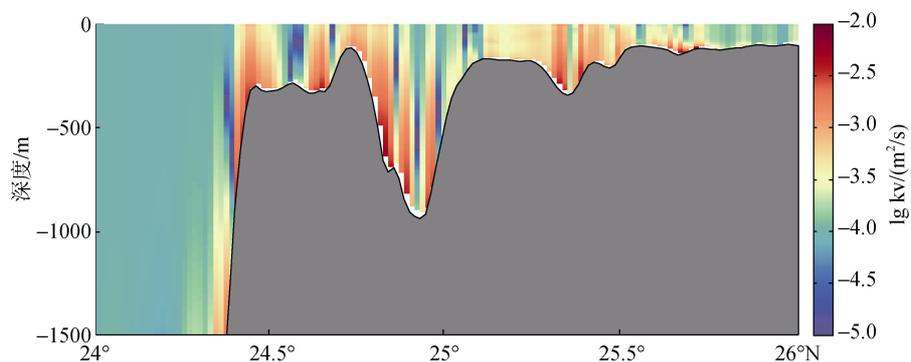


图 8 参照组 A 断面垂向扩散系数分布

Fig. 8 Model-predicted distribution of the depth-averaged vertical diffusivities in case A

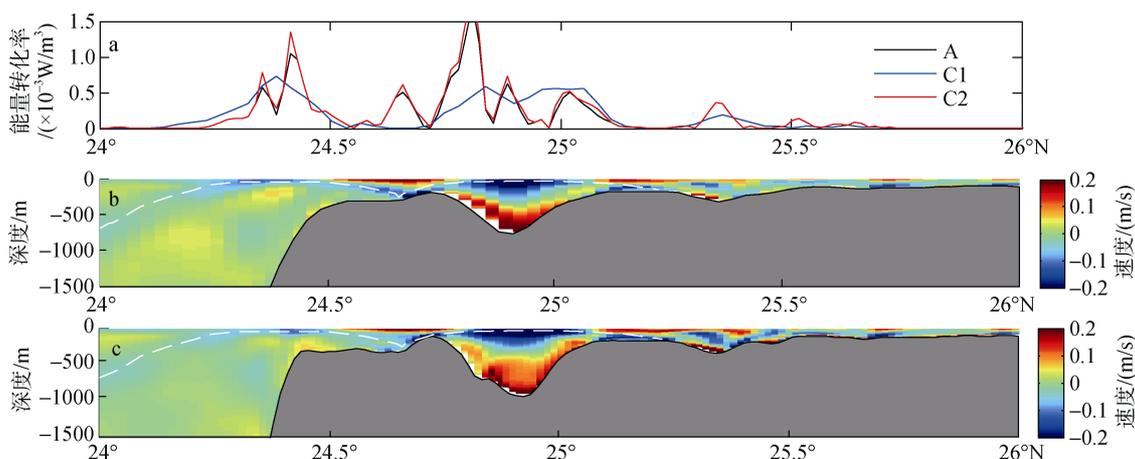


图 9 不同水平分辨率内潮的能量转化率(a)以及实验 C1(b)和 C2(c)的瞬时水平流速

Fig. 9 Horizontal distribution of depth-integrated and period-averaged conversion rates in various model cases (a), instantaneous zonal velocity amplitudes in case C1 (b) and case C2 (c)

由于台湾东北部海域存在陆架、路坡等水深较浅的海域，局地热通量存在着明显的差异，在冬季与夏季的层结结构具有显著的变化(图 3)。为了探究不同季节层结条件下，内潮在两源区共振的生成和传播过程的异同，参照标准实验 A，两组敏感性实验的初始条件选取 WOA5 六月的月平均温盐作为夏季层结(实验 D1)，十二月的月平均温盐作为冬季层结(实验 D2)。通过数值模拟结果可知(图 10)，内潮在夏

季层结下内潮的生成能量较强；而冬季层结下虽然仍存在双源区共振的条件，但是与夏季相比温跃层减弱，内潮由于温跃层的变化使得水平波长变短，与两源区距离契合程度不如强跃层条件，两源区共振相对较弱。

### 3 结论

本文基于三维静力近似的 ROMS 模式对台湾东

北部海域两源区共振的条件下 M2 内潮的生成传播、耗散混合及影响因子进行了模拟研究。数值模式在

内潮生成海域采用实际地形数据, 四个开边界进行单分潮驱动。通过选取二维断面的模式结果表明:

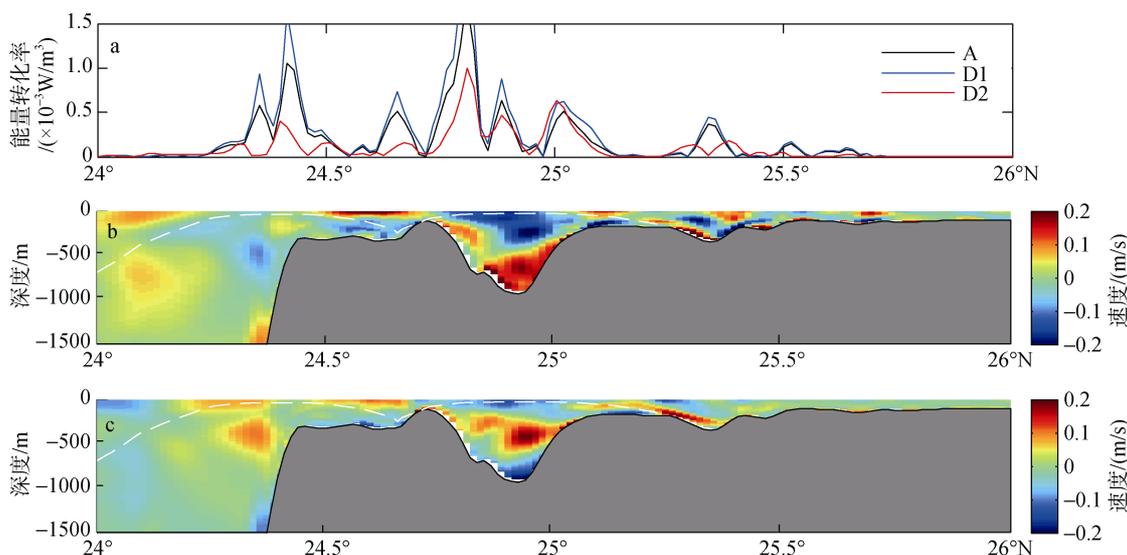


图 10 不同层结条件下内潮的能量转化率(a)以及实验 D1(b)和实验 D2 的瞬时水平流速(c)

Fig. 10 Horizontal distribution of depth-integrated and period-averaged conversion rates in various model cases (a), instantaneous zonal velocity amplitudes in case D1 (b) and case D2 (c)

1) 内潮主要产生在变化较为陡峭的海底地形, 多模态结构在垂向发生叠加, 以射线的形式从源区向两侧传播;

2) 在 Mien-Hua 海底峡谷和 I-lan 海脊两源区的间距与 M2 内潮水平波长相当, 存在着双源区共振效应;

3) 由于共振效应使得内潮在两源区生成的能量增强的同时, 部分内潮能量向高模态转化, 由于高模态的剪切不稳定性, 加强两源区内潮的耗散和混合。

本文通过敏感性实验分析了在不同网格分辨率与季节层化条件下双源区共振对内潮的影响。准确刻画台湾东北部内潮的生成与传播特征, 需要较高的模式分辨率。内潮生成的能量随着分辨率的提高而增大, 当分辨率达到一定精度时, 内潮生成的能量基本趋于稳定。冬季层结与夏季层结下的模拟结果显示, 层结的变化对源区共振的本质影响较小, 在夏季强跃层条件下内潮生成的能量较强, 反之, 在冬季层结较弱时内潮生成的能量较小。

台湾东北部海域存在着其他中尺度过程, 本文仅对内潮进行模拟研究; 未来可在模式中导入风场、环流等其他条件, 研究黑潮及上升流等其他尺度过程对内潮生成演化的影响。

参考文献:

[1] Simmons H L, Hallberg R W, Arbic B K. Internal wave

generation in a global baroclinic tide model[J]. Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography, 2004, 51(25-26): 3043-3068.

[2] 方欣华. 海洋内波基础和中国海内波[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005.

Fang Xinhua, Du Tao. Fundamentals of Oceanic Internal Waves and Internal Waves in the China Seas [M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2005.

[3] Wunsch C. Internal tides in the ocean[J]. Reviews of Geophysics & Space Physics, 1975, 13 (1): 167-182.

[4] 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.

[5] 司广成, 于非, 刁新源. 南海北部中尺度涡与内波相遇的特征分析[J]. 海洋科学, 2014, 38(7): 89-94.

SI Guangcheng, YU Fei, DIAO Xinyuan. Characteristics of encounter between a mesoscale eddy and internal waves in the northern South China Sea[J]. Marine Sciences, 2014, 38(7): 89-94.

[6] Zhao Z. Internal tide radiation from the Luzon Strait[J]. J Geophys Res Oceans, 2014, 119: 5434-5448.

[7] Niwa Y, Hibiya T. Three-dimensional numerical simulation of M2 internal tides in the East China Sea[J]. J Geophys Res, 2004, 109: C04027.

[8] Carter G S, Merrifield M A, Becher J M, et al. Energetics of M2 barotropic-to-baroclinic tidal conversion at the Hawaiian Islands[J]. J Phys Oceanogr, 2008, 38: 2205- 2223.

- [9] 李秉天, 王永刚, 魏泽勋, 等. 渤海主要分潮的模拟及地形演变对潮波影响的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(1): 9-16.  
Li Bingtian, Wang Yonggang, Wei Zexun, et al. Numerical Study on tides of Bohai Sea and impact of topography changes on the tidal wave system[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica* 2015, 46(1): 9-16.
- [10] Jan S, Lien R C, Ting C H. Numerical study of baroclinic tides in Luzon Strait[J]. *J Oceanogr*, 2008, 64(5): 789-802.
- [11] Gao X, Wei Z, Lv X et al. Numerical study of tidal dynamics in the South China Sea with adjoint method[J]. *Ocean Modelling*, 2015, 92: 101-114.
- [12] Miao C, Chen H, Lv X. An isopycnic-coordinate internal tide model and its application to the South China Sea[J]. *Chin J Oceanol Limnol*, 2011, 29(6): 1339-1356.
- [13] Lien R C, Sanford T B, Jan S, et al. Internal tides on the East China Sea Continental Slope[J]. *Journal of Marine Research*, 2013, 71(1): 151-185.
- [14] Duda T F, Newhall A E, Gawarkiewicz G, et al. Significant internal waves and internal tides measured northeast of Taiwan[J]. *Journal of Marine Research*, 2013, volume 71: 47-81.
- [15] Shchepetkin A F, McWilliams J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model[J]. *Ocean Modelling*, 2005, 9: 347-404.
- [16] Kang D, Fringer O. Energetics of barotropic and baroclinic tides in the Monterey Bay area[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2012, 42(2): 272-290.
- [17] Alford M H, Mackinnon J A, Nash J D, et al. Energy flux and dissipation in Luzon Strait: two tales of two ridges[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2011, 41(11): 2211-2222.
- [18] Buijsman M C, Klymak J M, Legg S, et al. Three-dimensional double-ridge internal tide resonance in Luzon Strait [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2014, 44(3): 850-869.
- [19] Xu Z, Liu K, Yin B, et al. Long-range propagation and associated variability of internal tides in the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2016, 121: 8268-8286.
- [20] Gregg M C. Scaling turbulent dissipation in the thermocline[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1989, 94(C7): 9686-9698.
- [21] Osborn T R. Estimates of the local rate of vertical diffusion from dissipation measurements[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1980, 10(1): 83-89.
- [22] St. Laurent L C, Simmons H L, Jayne S R. Estimating tidally driven mixing in the deep ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(23): 21-1-21-4.

## Effects of topographical resonance on the evolution of M2 internal tides northeast of Taiwan

CHANG Hang<sup>1</sup>, CAO Sheng-shan<sup>1</sup>, XU Zhen-hua<sup>2, 3</sup>, YIN Bao-shu<sup>2, 3, 4</sup>

(1. Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key laboratory of Ocean Circulation and Wave, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266200, China; 4. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Jun. 2, 2017

**Key words:** northeast of Taiwan; internal tides; ROMS(Regional Ocean Modeling System); resonance

**Abstract:** Barotropic tides, variable bottom topography, and vertical stratification are important factors influencing the generation of internal tides. Northeast of Taiwan, M2 internal tides are effectively generated over multiple and varying topographical features that form a complex wave field. In this study, we used the Regional Ocean Modeling System to investigate the generation, propagation, and dissipation of the M2 internal tides northeast of Taiwan. The results of our numerical experiments show that the distance between the I-Lan ridge and the Mien-Hua canyon is comparable to the wavelength of M2 internal tides. The barotropic-to-baroclinic energy conversion and dissipation associated with these two sources are effectively amplified by the resonance mechanism. We used sensitive numerical experiments to investigate other factors affecting the generation of M2 internal tides. A higher resolution model can better represent small-scale topographical features, which is important for simulating the distribution of the generation sites. The results also show that stratification influences the generation and propagation of internal tides whereas the effect of the resonance mechanism is negligible.

(本文编辑: 李晓燕)