

台湾浅滩阻塞作用的初步研究

张庆华 陈水明 乔方利 董昌明

(国家海洋局地球流体力学与数值模拟重点实验室, 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266003)

关键词 浅滩阻塞 上升流 南海急流

1 引言

位于台湾岛西南横跨海峡的台湾浅滩处的水深不足 20 m (图 1), 它对于平均水深 50 m 的台湾海峡中的流动有明显的阻塞作用. 为了了解台湾暖流在浅滩附近的变化, 我们有必要对浅滩阻塞的动力学机制进行深入研究.

2 模型的建立

考虑海峡中的定常流动. 将海峡特征宽度 $L = 150$ km 作为流动的水平尺度, 平均水深 $H = 50$ m 作为垂直特征尺度. 由于海峡中暖流通量约 1.5×10^6 m³/s, 所以特征速度 $U = 0.2$ m/s. 科氏参数 $f = 2\Omega \times \sin 23.5^\circ = 0.6 \times 10^{-4}$ s⁻¹. 取垂直涡粘系数 $A_v = 3 \times 10^{-3}$ m²/s, 水平涡粘系数 $A_h = 3 \times 10^3$ m²/s. 这样无量纲参数

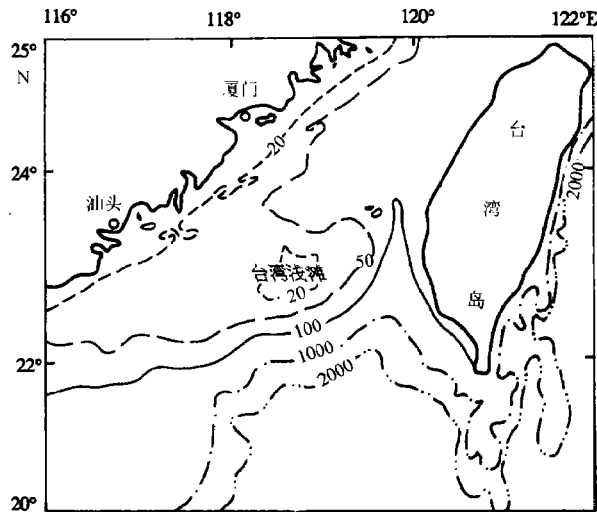


图 1 台湾浅滩及其邻近海域水深 (单位: m)

$$\text{Rossby 数} \quad \epsilon = \frac{U}{fL} = 0.023,$$

$$\text{垂直 Ekman 数} \quad E_v = \frac{2A_v}{fH^2} = 0.04,$$

$$\text{水平 Ekman 数} \quad E_h = \frac{2A_h}{fH^2} = 0.0044,$$

本文于 1998-05-10 收到, 修改稿于 1998-08-20 收到.

第一作者简介: 张庆华, 男, 57 岁, 研究员, 博士, 现从事海洋动力学研究.

于是无量纲的动量方程和连续性方程为

$$\begin{cases} \epsilon \frac{du}{dt} - v = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{E_v}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{E_h}{2} \nabla^2 u, \\ \epsilon \frac{dv}{dt} + u = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{E_v}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{E_h}{2} \nabla^2 v, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

这里直角坐标系 (x, y, z) 的原点取在浅滩中心区的平均海平面上. z 向上为正, y 为沿海峡指向东北. ζ 为海面升高, $z = h(x, y) - 1$ 为海底地形. 将速度分量 u, v, ω 和压力 p 展成 Rossby 数的级数. 代入方程 (1), 其零阶近似为地转关系:

$$v_0 = \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad u_0 = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad \psi = p_0, \quad (2)$$

一阶近似为涡度方程

$$\frac{d}{dt} \nabla^2 \psi = \frac{\partial \omega_1}{\partial z}, \quad (3)$$

从海底 $z = h - 1$ 到海面 $z = \zeta$ 对方程 (3) 求积分得到

$$(1 - h) \frac{d}{dt} \nabla^2 \psi = \omega_1 \Big|_{z=\zeta} - \omega_1 \Big|_{z=h-1}, \quad (4)$$

据表面 Ekman 层的特征^[1]有:

$$\epsilon \omega_1 \Big|_{z=\zeta} = \frac{d\zeta}{dt} + k \cdot (\nabla \times \tau),$$

考虑均匀风场, $\nabla \times \tau = 0$, 我们可以得到:

$$\omega_1 \Big|_{z=\zeta} = \frac{d\zeta}{\epsilon dt} = F \frac{d\psi}{dt} = F \left(-\frac{\partial \psi \partial \psi}{\partial y \partial x} + \frac{\partial \psi \partial \psi}{\partial x \partial y} \right) = 0, \quad (5)$$

利用底 Ekman 泵的抽吸公式:

$$\omega_1 \Big|_{z=h-1} = \frac{E_v^{1/2}}{2\epsilon} \nabla^2 \psi + \frac{1}{\epsilon} \frac{dh}{dt}, \quad (6)$$

代入方程 (4) 可得到

$$\frac{2\epsilon(1-h)}{E_v^{1/2}} \frac{d}{dt} \nabla^2 \psi = - \left(\nabla^2 \varphi + \frac{2}{E_v^{1/2}} \frac{d}{dt} \frac{d\zeta}{dt} \right), \quad (7)$$

由于 $\frac{2\epsilon(1-h)}{E_v^{1/2}} \approx 0.2 \ll 1$, 式 (7) 左端项能被忽略. 这意味着精确到 $O(E_v^{1/2})$ 的底边界层内垂直速度为零^[2]. 因此流函数满足如下方程:

$$\nabla^2 \psi + \frac{2}{E_v^{1/2}} \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0, \quad (8)$$

由于地形的影响是局部的, 所以可设想远离浅滩为均匀平行流:

$$u = 0, \quad v = \frac{V_0}{x_1 - x_0}, \quad |y| \ll 1. \quad (9)$$

对应流函数:

$$\psi = V_0 \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}, \quad |y| \gg 1,$$

这里 $x_0(y)$ 和 $x_1(y)$ 为海峡两岸的坐标. 于是流函数 ψ 的边界条件为

$$\begin{cases} \psi \Big|_{x=x_0} = 0, \\ \psi \Big|_{x=x_1} = V_0, \\ \psi \Big|_{|y| \gg 1} = \frac{V_0(x-x_0)}{x_1-x_0} \end{cases} \quad (10)$$

垂直积分方程 (3), 并利用式 (5) 能得到上升流的分布

$$\omega_1(x, y, z) = \int_z^{\infty} \frac{\partial \omega_1}{\partial z} dz = z \frac{d}{dt} \nabla^2 \psi, \quad (11)$$

有量纲垂直速度

$$\bar{\omega}^*(x, y, z) = \epsilon \frac{HU}{L} \omega_1(x, y, z) = \omega_1(x, y, z) \times 0.8 \times 10^{-4} (\text{cm/s}),$$

或平均上升流速度

$$\overline{\omega^*(x, y, z)} = \frac{1}{1-h} \int_{h-1}^0 \omega^*(x, y, z) dz = \frac{h-1}{2} \frac{d}{dt} \nabla^2 \psi \times 0.8 \times 10^{-4} (\text{cm/s}). \quad (12)$$

3 计算结果和讨论

由于我们的兴趣主要是海流在浅滩附近的变异, 不妨就将台湾海峡当作等宽渠道. 根据浅滩地形特征, 将浅滩地形简化为

$$h = -x^2 + \exp[-4(x-0.5)^2 - y^2] + (x+1)[\text{th}(y+2) - 1].$$

如图 2 所示. 数值求解边值问题 (8)、(10), 其流线分布如图 3 所示. 方程 (8) 可写为

$$\nabla^2 \psi = -\frac{2}{E^{1/2}} v \cdot \nabla h,$$

这说明, 当暖流接近浅滩时, 由于地形抬升, $v \cdot \nabla h > 0$, 所以 $\nabla^2 \psi < 0$; 当暖流越过浅滩, 海底下倾, $v \cdot \nabla h < 0$, 所以 $\nabla^2 \psi > 0$. 因此流线在浅滩前是反时针弯曲, 向左岸集中, 在浅滩后流线呈顺时针弯曲, 向右岸集中. 它们分别对应汕头外海的南海急流和靠近台湾岛的澎湖水道^[3].

当平行来流涡度 $\nabla^2 \psi = 0$, 接近浅滩时变为 $\nabla^2 \psi < 0$, 于是 $\frac{d}{dt} \nabla^2 \psi < 0$, 据关系式 (11) (注意到 $z < 0$), 有 $\omega_1 > 0$, 当流动离开浅滩时, 涡度由 $\nabla^2 \psi > 0$ 逐渐变为 $\nabla^2 \psi = 0$, 同样 $\frac{d}{dt} \nabla^2 \psi < 0$, 也有 $\omega_1 > 0$. 这说明由于浅滩的抬升作用, 在浅滩前、后都会诱生上升流如图 4 所示. 从观测到的该海区盐度分布图 (参见文献 [4] 图 2) 可看到, 浅滩前后均有高盐区, 它正好对应上升流区.

这里给出了一种非风生上升流的生成机制. 显然当潮流作用在岛礁群时也必定会激发海水的垂直运动, 包括上升流. 这就不难理解为什么舟山群岛附近成为一个巨大的渔场了.

4 结论

在正压近似, 不计风场作用的条件下, 有如下结论:

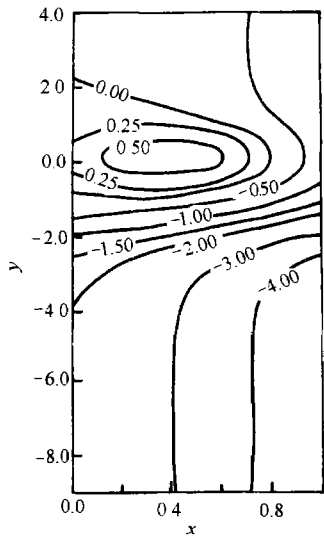


图2 台湾浅滩模拟地形

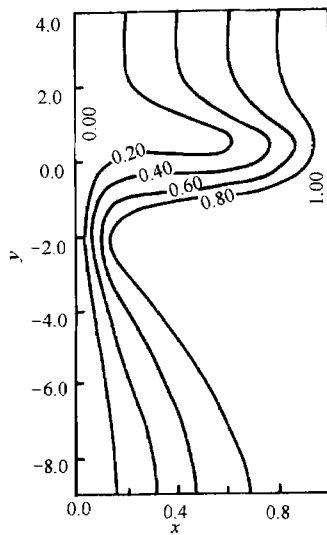


图3 台湾浅滩模拟流线分布

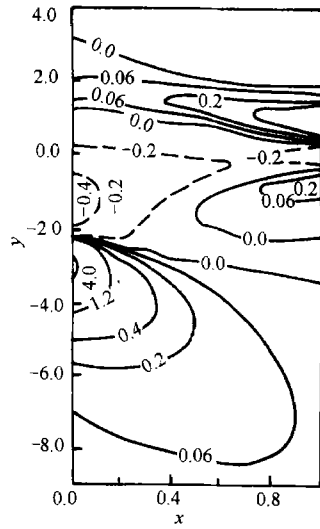


图4 台湾浅滩附近的模拟上升流分布

4.1 对于北向的台湾暖流, 由于地形的阻塞作用, 浅滩前流动呈反时针弯转, 在浅滩后呈顺时针弯转, 它们分别对应南海急流和澎湖水道。

4.2 当暖流跨越浅滩时, 由于地形的抬升作用在浅滩前和浅滩后都将诱生上升流, 它们与闽南渔场位置是一致的。其上升流速可达 10^{-3} cm/s。

参考文献

- 1 Pedlosky J. Geophysical Fluid Dynamics, Chapter 4. Springer-Verlag, 1987, 710
- 2 Zhang Q H, Janowitz G, Pietrafesa L. The interaction of estuarine and shelf waters: a model and applications. J. Phys. Oceanogr., 1987, 17, 455~469
- 3 Guan Bingxian. Evidence for a counter-wind current in winter off the southeast coast of China. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1986, (4): 319~332
- 4 陈金泉, 傅子琅, 李法西. 关于闽南-台湾浅滩渔场上升流的研究. 台湾海峡, 1982, 1 (2): 5~13

On obstructing effect of the Taiwan Shoal

Zhang Qinghua,¹ Chen Shuiming,¹ Qiao Fangli,¹ Dong Changming¹

1. Key Lab. of Geophysical Fluid Dynamics and Numerical Modelling, State Oceanic Administration;
First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266003

Key words Taiwan Shoal, obstructing effect, upwelling