

台湾海峡三维风海流的数值模拟

任华堂 刘钦政 吴辉碇

(国家海洋环境预报中心 北京)

摘 要 本文利用 POM 模式模拟了季风在台湾海峡引起的风海流以及三维流场结构。在冬季和夏季两种条件下, 得出了季风引起的水位变化和三维流场结构。结果显示在冬季季风的作用下, 海峡的东部和北部发生减水而西南部产生增水; 在夏季海峡北部产生增水而东南部和西南部产生减水。在科氏力的作用下, 风海流表层流向偏于风向右侧。风海流在 20m 处形成的流场和底层流场本文也给出了模拟结果。流速的艾克曼螺线显示: 该海域的流速并不随水深加大而一致减小, 而是先减小至一定深度再稍微增大, 然后继续衰减至零。

关键词: POM 模式; 风海流; 水位; 流场; 台湾海峡

中图分类号: P445 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2002)-04-0024-09

1 引言

台湾海峡是我国最大的海峡, 它是连接中国大陆和台湾的水域。台湾海峡为中国南北方之间的海上交通要道, 是著名的远东海上走廊。作为由大陆架向大洋的过渡海区, 台湾海峡地形复杂(见图 1), 北部水深 60~80m, 南部水深 40~50m, 平均水深约 60m。海峡中有一个 NE-SW 向的隆起带, 由台湾浅滩、台中浅滩和澎湖列岛组成。东西两侧各有 20m 和 50m 水深的两级阶地。东侧阶地较窄, 50m 等深线距岸一般为 10~20km; 西侧阶地向外延伸, 宽度较大, 50m 等深线距岸达 40~50km。澎湖列岛与台湾本岛之间是澎湖水道, 沿澎湖水道向东南, 水深逐渐增至 160m 左右, 然后剧增至 1000 多米。风海流三维结构和水深有比较大的关系, 同样风应力的作用下由于地形的不同可能会得到差异很大的结果。台湾海峡复杂多变的地形对该海区风海流的特性无疑会产生较大的影响。鉴于台湾海峡海流的观测资料的缺乏, 本文的计算结果目前尚无实测资料验证, 只能和前人的模拟结果做比较, 以相互印证。

本文于 2002 年 5 月 16 日收到。

作者简介: 任华堂(1976-)男, 硕士, 主要从事海洋环境的数值预报模式研究。本文承十五国家重点科技攻关项目 2001BA603B-03 资助。

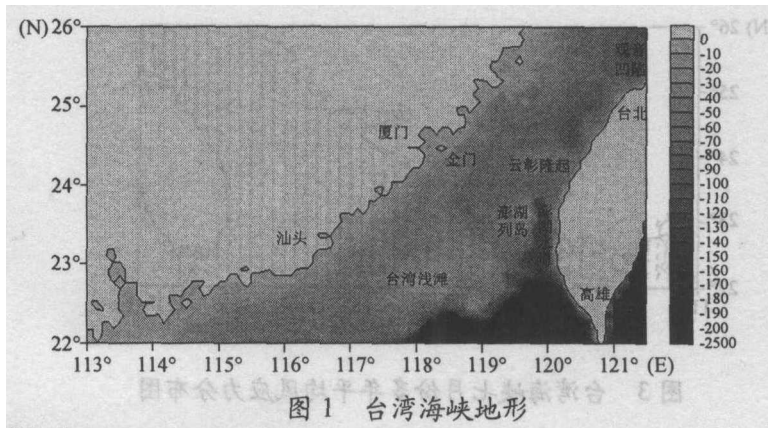


图 1 台湾海峡地形

2 海洋模式

为了有效地模拟台湾海峡的风海流特性, 本文采用 σ 坐标原始方程海洋模式 POM^[1-2] (Princeton Ocean Model)。该模式可以有效地模拟河口、海岸地区。目前该模式已被广泛应用于世界大洋的众多海区, 计算结果和实测资料基本一致, 具有比较强的可靠性。

该模式采用 Mellor-Yamada 二阶湍流闭合模式^[3] 计算垂向混合系数; 采用内外模分裂解法对方程求解, 外模计算垂向平均的二维动量方程, 受波速较大的重力外波的限制, 时间步长较小。内模求解三维方程, 时间步长相对较大; 采用自由表面而不是刚盖近似, 故能更加准确的反映重力外波的作用; 时间差分在水平方向上采用显式差分, 垂向差分采用隐式格式; 水平差分网格为“Arakawa C”网格。

2.1 海面大气动力强迫

台湾海峡处于亚热带季风区, 本文模拟了台湾海峡在冬季和夏季季风强迫下的风海流特性。模拟试验所使用的大气动力强迫资料来源于 HELLERMAN (<http://Ingrid.lidgo.Columbia.edu/SOURCES>) 所提供的 1 月份和 7 月份多年平均的 $2^\circ \times 2^\circ$ 网格的风场资料, 经过双线性插值得出。为了防止在数值计算中陆地边界附近出现振荡, 陆地边界附近的风应力在不失真的条件下适当减小。图 2、3 给出了所用的冬季 (1 月份) 和夏季 (7 月份) 的多年平均风应力分布。

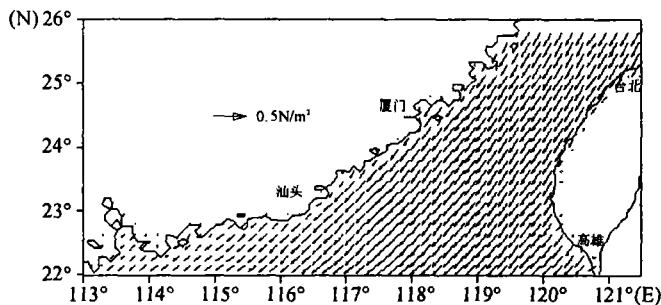


图 2 台湾海峡一月份多年平均风应力分布图

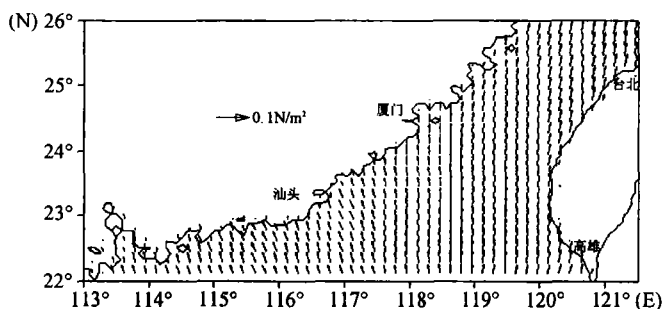


图3 台湾海峡七月份多年平均风应力分布图

台湾海峡在冬季风向基本与海峡的走向一致, 应力约为 $0.20 \sim 0.25 \text{ Nm}^{-2}$, 汕头以南的大陆沿岸风应力较小, 一般小于 0.20 Nm^{-2} 。

台湾海峡在夏季基本上为正南风。风应力远比冬季小, 约为 0.03 Nm^{-2} 。汕头以南的大陆沿岸风应力更小, 并且左偏, 近似于东南风, 而海峡的东北部风向右偏, 但偏转角度不大。

2.2 模拟区域和边界条件

台湾海峡风海流数值模拟的计算区域为: $22^{\circ}00' \text{ N} \sim 26^{\circ}00' \text{ N}$; $113^{\circ}00' \text{ E} \sim 121^{\circ}30' \text{ E}$, 如图1所示。水平网格为 $5' \times 5'$, 垂直方向分为10层。

边界条件采用上表面为自由表面:

$$\frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial U}{\partial \sigma}, \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) = C_z [U^2 + V^2]^{1/2} (U, V), \sigma \rightarrow 0 \text{ 右端为风应力。}$$

模式开边界条件: 在开边界处水位法向导数为零, $\frac{\partial \eta}{\partial n} = 0$

开边界速度采用辐射边界条件, 对于二维为:

$H\bar{U} \pm c_r \eta = BC$, BC 为给定值, 本文给定为零。

对于三维为: $\frac{\partial U}{\partial t} \pm c_r \frac{\partial U}{\partial x} = 0$

3 模拟试验

本文的模拟试验仅考虑了大气动力强迫, 即在海洋和大气之间只有动量通量, 没有热通量和水汽通量。此外, 本文也没有考虑密度分布及其变化的影响所引起的流动。外模步长取 20 s , 内模步长取 600 s 。在如前所述的风应力强迫下由静止算起, 积分 60 d 后达到平衡状态。试验结果归纳如下:

3.1 冬季风海流流场特征及海流的垂直结构

(1) 一月份季风作用下的海面水位:

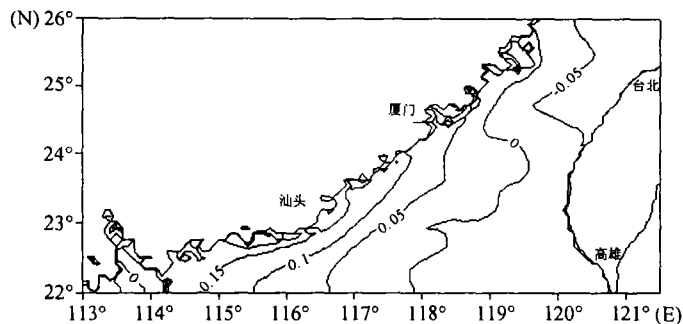


图 4 东北季风条件下海面水位图 (m)

如图 4 所示, 在东北季风的作用下, 海水向西南流动, 形成东部和北部水位较低, 最低处低于海平面 0.10m。而西南部水位明显抬升, 在大陆的东南沿岸海面壅升达 0.26m。对照该海区的表层流场分布图不难理解, 这主要是因为科氏力的作用下表层流向偏于风向之右, 表层水体基本由东向西输运, 东部和北部出现减水, 西南部水位壅升, 直至风应力和水体受到的压强梯度力及科氏力平衡为止。

(2) 流场的分布特征:

从图 5 不难看出, 在冬季的东北季风作用下, 台湾海峡的表层流基本与风应力的走向一致, 但是由于地转偏向力的作用, 表层流向偏于风向右方。在靠近西部边界时, 由于边界的阻挡, 表层流为西南流, 与岸线平行。在台湾沿岸海域, 海流主要为离岸流, 海水向西流动。海峡东南部有西北方向的流动。

在表层流速较大, 大部分海区流速在 0.2m/s~0.4m/s 之间。在台湾海峡的北端由于有外海的水体涌入海峡, 形成一流速较大的区域, 流速最大处达 0.7m/s。在台湾浅滩由于水深变浅, 并且其东北侧和西南侧的水体汇聚于此形成一支流速较大的海流一起流向大陆沿岸并顺岸而下, 其流速在 0.4m/s ~ 0.7m/s 之间。该分布特征与文献 [5] 基本一致, 唯一不同之处在于文献 [5] 中浅滩东南部有比较明显的逆时针方向的旋转流。作者认为这可能是因为文献 [6] 将左侧的固体边界经过移至 116°E 后, 此处产生虚假的向南流动的沿岸流所致。本结果和文献 [4] 相比, 不同之处在于文献 [4] 没有模拟出大陆沿岸的沿岸流。

在海洋近岸地区海流成分比较复杂, 可以将该海区从表面到海底分成三层: 上 Ekman 层、下 Ekman 层和中层纯地转流, 各层的厚度和水深密切相关。水深越小, 上 Ekman 层和下 Ekman 层就靠的越近甚至重叠。在上 Ekman 层流速随深度增加, 流向不断右偏; 而在下 Ekman 层随深度增加, 流向不断左偏。由于水深的复杂多变, 在各点该三层的厚

度变化比较大,从而流速的偏转角度在各个地方也不一样,再加上地形对海水流动的反射作用,20m 处的流场已经和表层迥然不同。

如图 6 所示,在水深 20m 处海峡内的流动更趋于不规则。大陆沿岸的流动因为主要受由于海面增高形成的地转流影响,所以与表层流动相似,继续沿岸南下,至台湾浅滩处由于水深变浅和梯度流影响的加剧,部分水体沿台湾浅滩向东流去。在海峡东南部的水体北上经过台湾浅滩和澎湖列岛之间的水道后,一支继续北上沿澎湖列岛形成一顺时针旋转流,另一支则向西沿岸南下。此外,在海峡东南部的水体还沿台湾浅滩南部向西

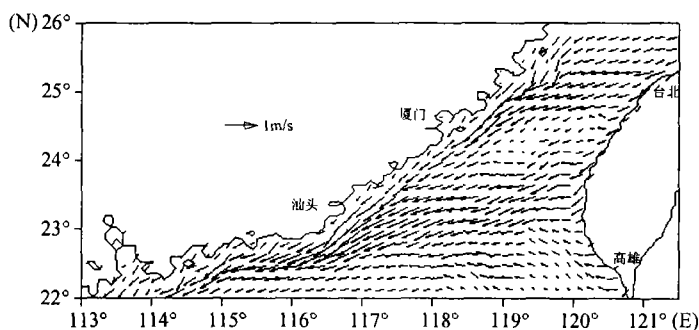


图 5 东北季风条件下台湾海峡表层风海流流速分布图

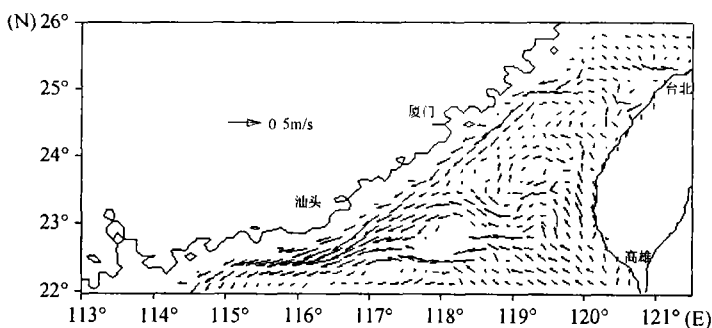


图 6 东北季风条件下台湾海峡 20m 层风海流流速分布图

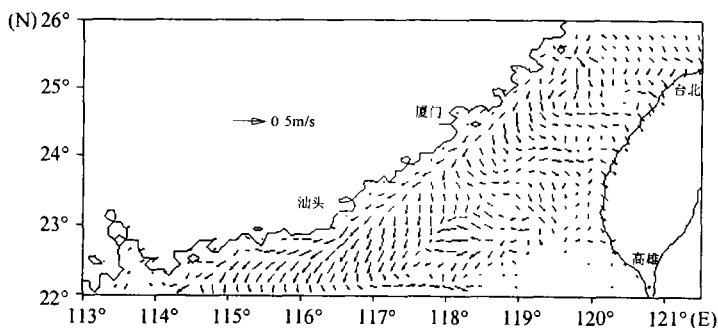


图 7 东北季风条件下台湾海峡底层风海流流速分布图

流动成为大陆沿岸流的一部分。本结果和文献 [4] 相比差别较大, 文献 [4] 的流场分布极不规则, 流向复杂多变。本文的结果和文献 [5] 相比, 和表层流相似除了本文在浅滩南部不存在逆时针旋转流外基本一致。

该海区在 20m 处流速已经比表层减小了很多。在汕头附近由于多支流动的混合成为海峡中流速最大的区域可达 0.4m/s。大陆沿岸的其他地方一般在 0.25m/s 左右, 其他海区的流速基本都在 0.2m/s 以下。

台湾海峡的底层流分布如图 7 所示, 在大陆沿岸依然是地转流为主, 主要为沿岸流, 而在其他大部分海区都为基本向东的流动, 这主要是在达到平衡时上层海水都流向西部需要下层海水的补充所致。在海峡的东南部因为水深较大, 底层流速已经衰减到可以忽略的程度。

(3) 台湾海峡海流的垂直结构:

在台湾海峡除了东南部外水深都比较小, 受海底摩擦力影响, 都为三层结构。为了分析方便, 现以 118°E, 23°40'N 处的垂直结构为例, 说明流速的垂直分布规律。由图 8 可知, 风海流流速随着深度的增加, 在科氏力的作用下流向不断右偏, 而且量值也随之减小, 但降至 40m 水深, 由于漂流与地转流流向夹角变小, 量值有所增大, 水深大于 50m 时, 由于底摩擦的影响, 流向开始左偏, 量值随之急剧减小至零。

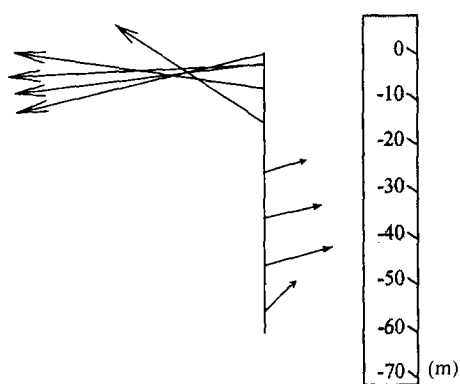


图 8 冬季 118°E, 23°40'N 处
流速垂直分布

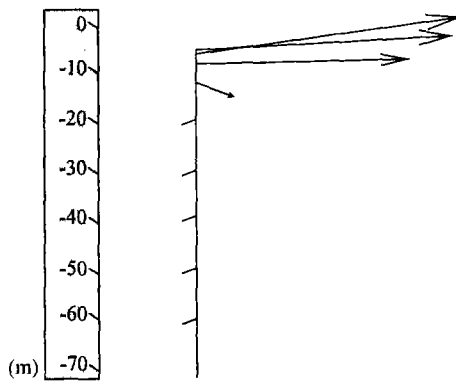


图 13 夏季 118°E, 23°40'N 处
流速垂直分布

3.2 夏季季风海流流场特征及海流的垂直结构

(1) 七月份夏季季风作用下的海面水位:

夏季季风条件下, 由于风力较弱海面变化基本不大, 总体来讲, 海峡南部水面低, 西北部水面抬高。东北部水面最高处高出海平面 1.6cm。海峡东南部发生减水现象, 最大处达 1cm 左右。其形成原因和冬季时系出一理, 此处不在赘述(见图 9)。

(2) 流场的分布特征:

图 10 模拟的表层流由于地转偏向力的作用发生右偏, 流向基本与海峡走向一致, 流

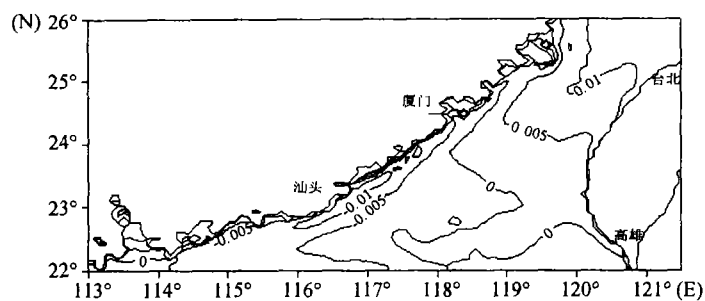


图 9 南风条件下台湾海峡海面水位图 (cm)

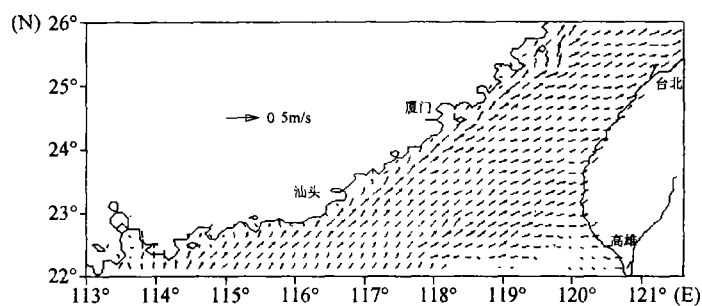


图 10 南风条件下台湾海峡表层风海流流速分布图

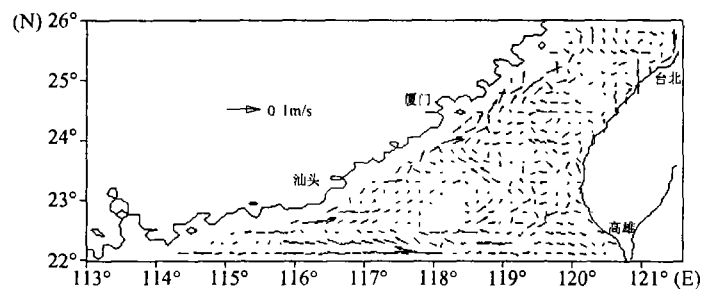


图 11 南风条件下台湾海峡 20m 层风海流流速分布图

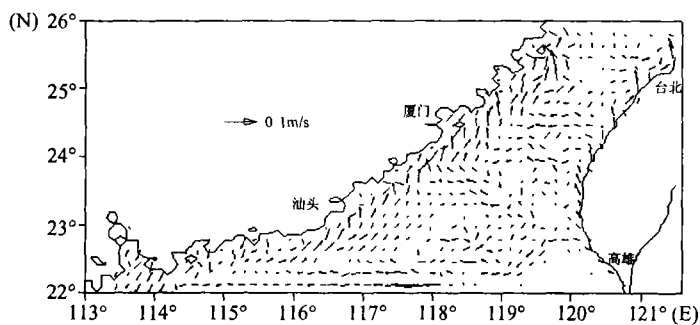


图 12 南风条件下台湾海峡底层风海流流速分布图

速大小也比较均匀, 在 0.25m/s 左右。在大陆沿岸为沿岸流, 流速较大, 可达 0.3m/s ; 在台湾沿岸为向岸流。

夏季季风条件下, 台湾海峡 20m 风海流流向和表层流大致相反, 流速分布也和表层分布有显著差异。流动方向比较复杂, 在台湾浅滩的南部和东部出现一逆时针方向的旋转流。整个海峡内主要以大致向东和向北的流动为主。除了本文得到的结果外, 文献 [5] 提到在台湾浅滩的东侧有一顺时针方向的旋流, 这在图 11 中不甚明显。

台湾海峡的底层流分布如图 12 所示, 大部分海域的海流流速都比较小, 小于 0.05m/s 。只有在海峡东侧沿岸流速比较大可达 0.08m/s 。

(3) 海峡海流的垂直结构:

由图 13 可知, 风海流流速随着深度的增加, 流向不断右偏, 而且量值也随之减小, 但水深降至 40m , 由于漂流与地转流流向夹角变小, 量值有所增大, 水深大于 50m 时, 由于底摩擦的影响, 流向开始左偏, 量值随之急剧减小至零。

4 结语

在冬季季风条件下海洋表层海水流动偏于风向右方, 呈现出自东向西的运动, 越靠近西部边界, 流速的南向分量越大, 在西岸海水基本呈沿岸流动。在水深 20m 处, 大部分海区流向为由西北向东南流动, 并存在两个比较明显的漩涡。

在夏季季风条件下海洋表层海水由西南向东北流动, 在台湾海峡的东南部由于水深变化剧烈, 流向比较杂乱。在水深 20m 的地方, 流速基本上都比较小, 在海峡的东南部由于水深比较大摩擦力的影响小, 形成一流速明显大于周围地区的逆时针旋涡。

通过对流速的艾克曼螺线的分析可知: 该海域的流速并不随水深加大而一致减小, 而是减小至一定深度处再稍微增大, 然后继续衰减至零。

参考文献

- [1] Blumburg A F, Mellor G L. A description of a three-dimension coastal ocean circulation model In: Three Dimensional Coastal Models (N. Heaps, ed), 208, American Geophysical Union. Washington DC., 1987
- [2] Mellor, G. L., S. Hakkinen, T. Ezer and R. Patchen, A generalization of a sigma coordinate ocean model and an intercomparison of model vertical grids, In: Ocean Forecasting: Conceptual Basis and Applications, N. Pinardi and J. D. Woods (Eds.), Springer, 2002, 55 ~ 72.
- [3] Mellor, G. L., and T. Yamada, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys., 1982, 20: 851 ~ 875.
- [4] 吴伯瑜. 台湾海峡风海流的数值计算. 海洋学报, 1982, 4(2): 139 ~ 148.
- [5] 陆风山等. 台湾海峡一种三维风海流数值计算模式. 台湾海峡, 1997, 16(4): 434 ~ 440

NUMERICAL SIMULATION OF 3D WIND CURRENT IN TAIWAN STRAIT

Ren Huatang Liu Qinzhen Wu Huiding

(National Marine and Environmental Forecasting Center, Beijing)

Abstract——Based on the POM model, the numerical simulation of wind current is studied under monsoon condition in Taiwan Strait. It is disclosed how the surface elevation and 3D velocity structure distribute in Taiwan Strait. In winter, the surface elevation of the southwest turns higher while the east and north lower, and in summer the north turns higher while the southwest and southeast lower. The outcome shows that the surface velocity direction is deviated from the wind. The velocity field at 20m depth and bottom is also discussed in this paper. This paper also shows how the velocity varies with depth, and draw a conclusion that the maximum velocity is not in the surface but in a certain depth.

Key words: POM model; wind current; surface elevation ; 3D velocity field ; Taiwan Strait