

支援溢油軌跡模擬所需海洋環境數值模式的初步建立—海溫的校驗

張國棟¹ 毛正氣² 黃文龍²
海洋環境工程系^{1,2} 海岸水與環境中心²
國立高雄海洋科技大學

摘要

臺灣四面環海且地處東南亞海運主要航道，任何船舶的意外事件，都可能造成臺灣附近海域及海岸遭受重大油污污染或災害。然而，臺灣海域廣闊，應變人力與能量有限，在海洋油污事件發生或將有油污污染可能之虞，如能預先有效掌握溢油未來漂移的軌跡與影響範圍，據以施行適當的應變規劃及處理，可有效的減緩油污對海洋環境以及重大海岸設施的衝擊。影響溢油在海面漂移過程中最主要的影響因素為海表面海流及風，而油團的蒸發速率與溶解速率則會受海表面溫度、空氣溫度、海況及風的影響，另外油團的分散速率及乳化速率則會受海表面風場及海況的影響。為提昇溢油軌跡模擬之可靠性，就必須要有準確的大氣與海洋環境預測資訊，本研究使用 sbPOM(Stony Brook Parallel Ocean Model)，配合天氣研究預報(Weather Research Forecast, WRF)模式所提供的風應力與熱輻射通量等資料，同時同化衛星遙測海表面溫度資料，初步建立台灣週邊海域海洋數值模式，將模式模擬海表面溫度與海域內浮標及船舶觀測之結果比較，發現不管有無資料同化，模擬誤差介於觀測值±4%的百分比均大於75.3%，均方根誤差小於1.226，相關係數大於0.886，技巧得分大於0.760，但模式經過資料同化衛星海表面溫度後，可以改善模擬結果，而且各校驗指標亦均有改善；同時隨著模擬時間的增加，各校驗指標會有略微變差的情況。而模式模擬海水垂直剖面溫度與海域內Argo或Drifter浮標觀測之結果比較，發現不管有無資料同化，模式模擬垂直剖面溫度趨勢均與觀測值一致，但模式經過資料同化衛星海表面溫度後，亦可以改善模式對於垂直剖面溫度模擬的結果。

關鍵字：sbPOM、WRF、資料同化

一、前言

臺灣四面環海且地處東南亞海運主要航道，由於地理位置特殊，使得社會、人文、經濟和自然資源與海洋環境息息相關，加上國際貿易興盛、工業發展需求，各類船舶經常航行臺灣四周海域。隨著經濟與民生發展，國內石化工業所需大量原油亦仰賴船舶載運輸入，石化產品承運業務量與日俱增。相對地，海洋污染風險也隨之增加，任何船舶的意外事件，都可能造成臺灣附近海域及海岸遭受重大油污污染災害。然而，臺灣海域廣闊，應變人力與能量有限，在海洋油污事件發生或將有油污污染可能之虞，如能預先有效掌握溢油未來漂移的軌跡與影響範圍，據以施行適當的應變規劃及處理，可有效的減緩油污對海洋環境以及重大海岸設施的衝擊。

牟林等(2011)認為影響溢油在海面漂移過程中最主要的影響因素為海表面海流及風，同時漂移過程亦是油團運動的最主要影響因素。而嚴志宇和殷佩海(2000)的研究則指出油團的蒸發速率與溶解速率則會受海表面溫度、空氣溫度、海況及風的影響，另外油團的分散速率及乳化速率則會受海表面風場及海況的影響。為提昇溢油軌跡模擬之可靠性，就必須要有準確的大氣與海洋環境預測資訊，本研究使用sbPOM模式，配合WRF模式所提供的大氣資料，並同化衛星遙測海表面溫度資料，初

步建立台灣週邊海域海洋數值模式，將模式模擬海溫與海域內浮標及船舶觀測之結果比較，發現二者結果相似。而模式模擬海水垂直剖面溫度與海域內觀測資料比較，發現不管有無資料同化，模式模擬垂直剖面溫度趨勢均與觀測值一致，但模式經過資料同化衛星海表面溫度後，亦可以略為改善模式對於垂直剖面溫度模擬的結果。

二、sbPOM模式簡介

sbPOM模式是架構在普林斯頓海洋模式(Princeton Ocean Model, POM)所發展(Jord and Wang, 2012)，最大的不同就是其程式碼已經平行化，因此對於海洋模擬能夠更快的獲得結果，同時亦提供了Matlab程式碼，讓使用者能夠快速地製作模式所需要的網格、潮汐、海洋初始狀態等資料。其主要的方程式如下：

$$\frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UV D}{\partial y} + \frac{\partial U \omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma_0} \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UV D}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V \omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma_0} \left[\frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] + F_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial TUD}{\partial x} + \frac{\partial TVD}{\partial y} + \frac{\partial T\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right] + F_T - \frac{\partial R}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SUD}{\partial x} + \frac{\partial SVD}{\partial y} + \frac{\partial S\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_S \quad (5)$$

$$\frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial Uq^2 D}{\partial x} + \frac{\partial Vq^2 D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right] + \frac{2K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \bar{p}}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^3}{B_1 l} + F_q \quad (6)$$

$$\frac{\partial q^2 l D}{\partial t} + \frac{\partial Uq^2 l D}{\partial x} + \frac{\partial Vq^2 l D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2 l}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma} \right] + E_1 l \left\{ \frac{K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + E_3 \frac{g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \bar{p}}{\partial \sigma} \right\} - \frac{Dq^3}{B_1} \tilde{W} + F_l \quad (7)$$

上式中：

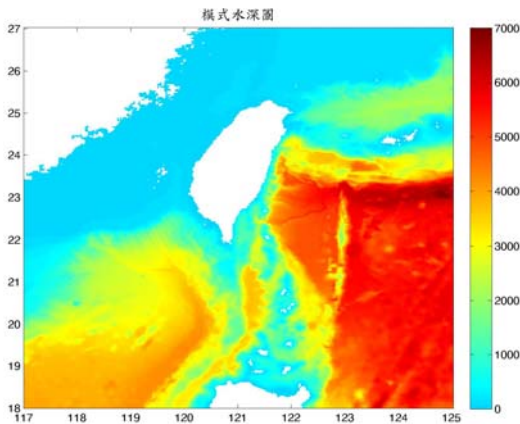
- T 為位溫；
- S 為鹽度；
- U 為水平x方向速度；
- V 為水平y方向速度；
- ω 為垂直方向速度；
- K_H 為位溫和鹽度的垂直渦流混合擴散係數；
- K_M 為動量的垂直渦流混合擴散係數；
- F_T 為位溫擴散產生之側向混合力；
- F_S 為鹽度擴散產生之側向混合力。

而 K_H 和 K_M 可以利用 Mellor and Yamada (1982) 所發展的亂流模式來計算。關於模式詳細介紹及變數說明內容可參考 Mellor (2003) 和 Blumberg and Mellor (1987)。

三、模式建置

(一) 模式設定

1. 模式範圍為東經117度至125.025度，北緯18度至27.025度。
2. 本研究使用海洋學門資料庫的500公尺水深資料(範圍為東經117度至125度，北緯18度至27度)及美國國家地理資料中心的ETOPO 1水深資料(其他區域)製作模式水深資料，模式範圍內的水深如圖一所示。



圖一 模式範圍水深圖

3. 為降低模式的水平壓力梯度誤差，故本研究參考王俊(一)的研究，對模式水深進行平滑處理(坡度係數取0.2)。

4. 水平解析度為1/40度*1/40度。

5. 垂直座標使用Sigma座標，垂直層數為40層。

6. 模式最小水深為5公尺。

(二) 海氣象資料

1. 模式所使用的氣候溫鹽資料依據網路上公開的通用數位環境模式 (Generalized Digital Environmental Model, GDEM) 氣候海溫及鹽度資料製作。

2. 模式初始狀態及開放邊界所需要的海平面高度、海溫、鹽度、流速資料使用網路上公開下載的混合座標海洋模式 (HYbrid Coordinate Ocean Model, HYCOM) 預報資料。

3. 模式所需要的大氣驅動力及熱通量(風應力、海平面氣壓、短波輻射通量、長波輻射通量、海表面氣溫、海表面水氣混合比、敏感熱通量及潛熱通量)由本中心所執行的WRF模式預報資料提供。

4. 模式共計使用使用K2、S2、M2、N2、K1、O1、P1、Q1等8個分潮，各分潮的振幅及相位資料由俄勒岡州立大學(Oregon State University, OSU)所發展的中國海(China Sea)潮汐模式提供。

(三) 資料同化

目前本中心所執行的sbPOM模式是同化高解析度海表面溫度團體(Group for High Resolution SST, GHRSSST)所提供的海表面溫度資料。

同化方法參考BARRON (2004)在全球海軍海洋模式中所使用的臨近(nudging)法，其公式如下：

$$R_{adjusted} = R + a \times (SST_{ASSIM} - SST_{MODEL}) \quad (8)$$

上式中：

$R_{adjusted}$ 為調整後的溫度通量；

R 為調整前的溫度通量；

a 為鬆弛率(relaxation rate)；

SST_{ASSIM} 為GHRSSST資料；

SST_{MODEL} 為模式預測海表面溫度。

由方程式(8)中可以瞭解，我們在進行資料同化時，必須給定 a 值，因此本研究設計三個方案，簡述如下：

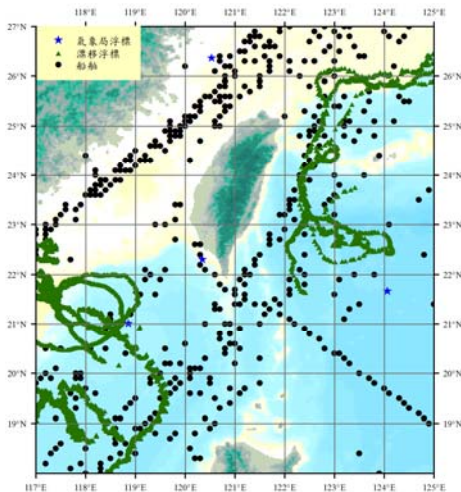
1. 方案1：無資料同化(noDA)。
2. 方案2：同化GHRSSST資料(DA 1)，relaxation rate=1.0md。
3. 方案3：同化GHRSSST資料(DA 2)，relaxation rate=10.0md。

四、模式模擬結果校驗

(一)校驗資料來源

本中心目前規劃模式初步校驗將以2014年春季(3至5月)的模擬結果進行,其中海表面溫度校驗所使用的資料(分布圖如圖二)如下:

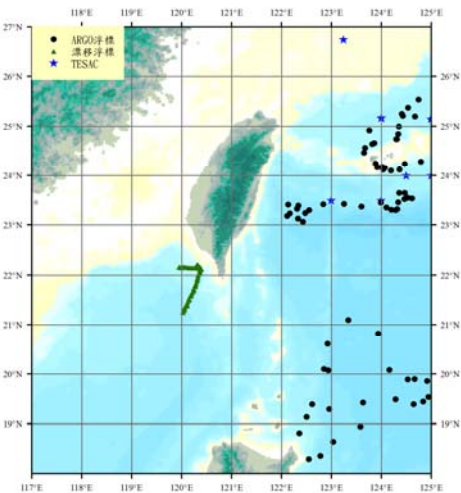
- 1.中央氣象局浮標觀測資料。
- 2.美國全球海洋資料同化實驗(Global Ocean Data Assimilation Experiment, GODAE)網站所下載的船舶觀測資料。
- 3.GODAE網站所下載的漂流浮標(Drifter)觀測資料。



圖二 2014年春季海表面溫度資料分布圖

本中心所使用的海水垂直剖面溫度校驗所使用的資料(分布圖如圖三)如下:

- 1.GODAE網站所下載的ARGO浮標資料。
- 2.GODAE網站所下載的Drifter觀測資料。
- 3.GODAE網站所下載的TESAC(WMO KKY Y 電碼, 為海上測站的溫度、鹽度及海流觀測報告)資料。



圖三 2014年春季海水剖面溫度資料分布圖

(二)校驗指標

有關預報資料驗證,本研究參考Murphy(1988)及Murphy and Epstein(1989)的文章,計算預報與觀測值的誤差及預報技巧,其中所採用的分析計算量為:

1.均方根誤差(root mean square error, RMSE)

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

上式中:

X_i 為觀測值;

Y_i 為模式模擬值;

n 為觀測資料筆數。

2.相關係數(correlation, R)

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sigma_x \sigma_y} \quad (10)$$

上式中:

\bar{X} 為觀測資料的平均值;

\bar{Y} 為模式模擬資料的平均值;

σ_x 為觀測資料的標準偏差;

σ_y 為模式模擬的標準偏差值。

3.技巧得分(skill score, SS)

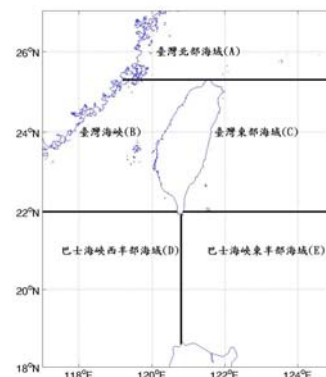
$$SS = R^2 - \left[R - \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x} \right) \right]^2 - \left[\frac{\bar{Y} - \bar{X}}{\sigma_x} \right]^2 \quad (11)$$

由相關的預報誤差及預報技巧計算量,瞭解模式整體的預報效能,藉此評估所使用的模式是否有需要調整的需要,如果需要調整,也可以比較模式參數調整前後對於預報效能是否有改善。

(三)校驗結果

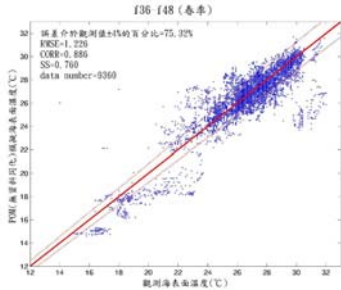
1.海表面溫度

本研究使用的校驗資料為浮標、船舶及漂流浮標觀測資料,因此在部分海域完全無資料,故本研究初步將模擬結果分成臺灣北部海域(A區)、臺灣海峽(B區)、臺灣東部海域(C區)、巴士海峽西半部海域(D區)及巴士海峽東半部海域(E區)等5個區域(如圖四)討論。另限於篇幅,本文中僅列出預報36時至48時(f36-f48)的校驗結果。

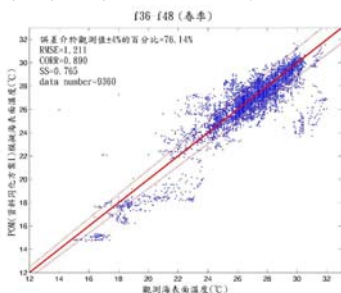


圖四 海表面溫度校驗結果分區圖

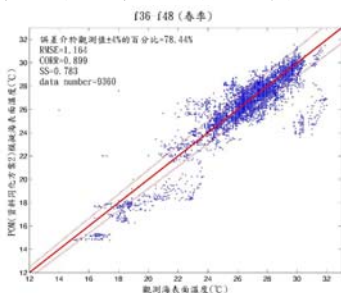
由圖五可知，模擬誤差介於觀測誤差 $\pm 4\%$ 的百分比均大於75.3%，均方根誤差小於1.226，相關係數大於0.886，技巧得分大於0.760，但模式經過資料同化衛星海表面溫度後，可以改善模擬結果，而且各校驗指標亦均有改善，且資料同化方案2優於資料同化方案1優於未資料同化；同時隨著模擬時間的增加，各校驗指標會有略微變差的情況。



(a)無資料同化的模擬及觀測海表面溫度散布圖



(b)資料同化方案1的模擬及觀測海表面溫度散布圖



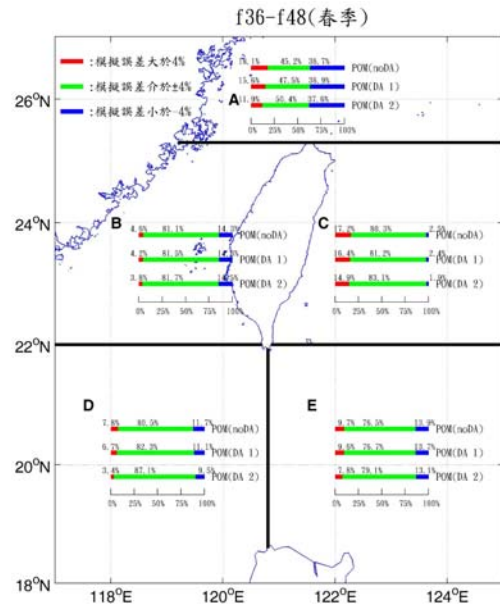
(c)資料同化方案2的模擬及觀測海表面溫度散布圖

圖五 模式模擬及觀測海表面溫度散布圖

而由各分區的模式校驗結果(如圖六)可知，模擬誤差百分比以臺灣北部海域(A區)最差(模擬誤差介於觀測誤差 $\pm 4\%$ 的百分比均小於50.4%)，該區預模擬結果有一部分偏低的情況；而其他區域的模擬誤差介於觀測誤差 $\pm 4\%$ 的百分比均超過76%。

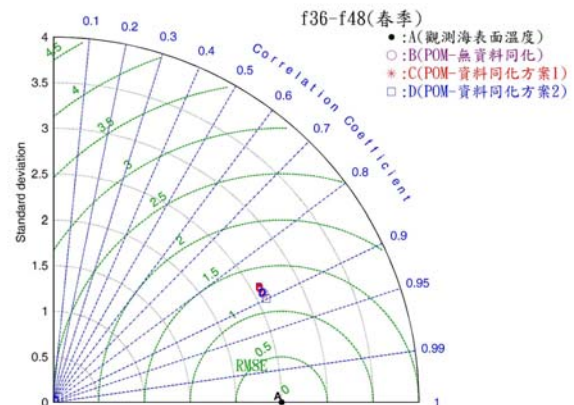
各區域的模擬誤差結果表現均為資料同化方案2優於資料同化方案1優於未資料同化。

模式經過資料同化衛星海表面溫度後，資料同化方案2在巴士海峽西半部海域(D區)的改善幅度最大(80.5% \rightarrow 87.1%)，臺灣海峽海域(B區)的改善幅度最小(81.1% \rightarrow 81.7%)。



圖六 各分區的模式模擬及觀測海表面誤差圖

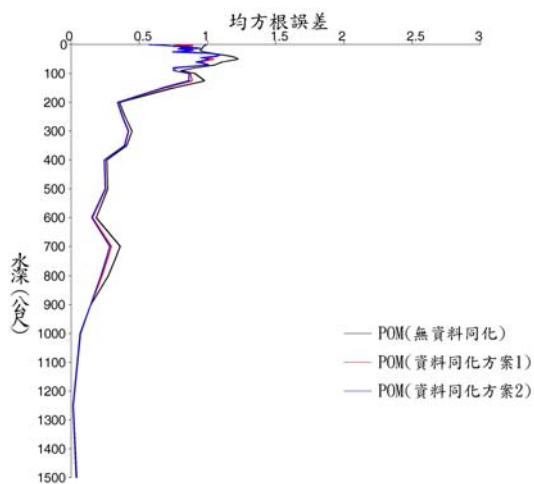
由三個方案的Taylordiag圖(如圖七)，可以發現三個方案的標準偏差與觀測值均類似，表示有相同的分佈特性，另外相關係數及均方根誤差均是資料同化方案2優於資料同化方案1優於未資料同化，但是差異並不大。



圖七 模式模擬與觀測海表面溫度Taylordiag圖

2.垂直剖面溫度

依據三個方案的垂直剖面溫度的均方根誤差圖(如圖八)，可以發現三個方案的均方根誤差在50公尺至150公尺略差，研判是模式對於海洋溫躍層的特性無法完全掌握，但是整個垂直剖面溫度的變化趨勢，模式仍能掌握；同時同化海表面溫度對於模式模擬效能的改善，會隨著深度的增加逐漸地變小。



圖七 模式模擬與觀測垂直剖面海溫均方根誤差圖

五、結論與建議

為了支援溢油軌跡模擬作業的需求，本研究利用平行化的sbPOM模式建置了台灣周邊海域的海洋數值預報模式，並透過與2014年春季觀測海溫資料的校驗，瞭解模式對於海表面溫度的模擬有相當不錯的表現。而由各分區的海表面溫度結果顯示，模式在臺灣北部海域的海表面溫度模擬有一部分模擬偏低的情況，未來將分析所使用的HYCOM資料，研究是否是HYCOM在此區就有預報偏低的情況。

經由同化海表面溫度後，對於模式模擬海表面溫度的效能亦有所提昇。本研究未來將針對資料同化衛星海表面溫度的最佳化鬆弛率進行研究。

模式模擬海水垂直剖面溫度與海域內Argo或Drifter浮標觀測之結果比較，發現不管有無資料同化，模式模擬垂直剖面溫度趨勢均與觀測值一致，但模式經過資料同化衛星海表面溫度後，亦可以改善模式對於垂直剖面溫度模擬的結果。但是因為此段時間內垂直剖面溫度觀測資料較少，在部分區域完全沒有資料，未來將視蒐集國內海洋研究船隻的CTD資料狀況，再將此部分加入校驗。

透過本研究所建立的台灣周邊海域海洋數值預報模式，未來將可以提供溢油軌跡模擬作業的所需的海流及海溫資料，進而預先有效掌握溢油未來漂移的軌跡與影響範圍，據以施行適當的應變規劃及處理，可有效的減緩油污對海洋環境以及重大海岸設施的衝擊。

致謝

本研究承蒙行政院環境保護署103年度「海洋污染緊急應變科學支援暨監控專案工作計畫」(計畫編號：EPA-103-G106-02-114)支持得以順利完成。

感謝中央氣象局海象測報中心提供浮標觀測資料予本中心，使本研究的校驗結果更為完整。

感謝汪東平教授提供sbPOM模式，使本研究能夠順利完成海洋模式的建置及模擬。

參考文獻

- 王俊，一：， σ 座標海洋模式水平壓力梯度計算的高階方法，國家海洋局第二海洋研究所碩士論文。
- 牟林，趙前主編，2011:海洋污染應急技術，第一版，四章一節，科學出版社，中國北京，68-88。
- 嚴志宇，殷佩海，2000:“海洋溢油蒸發過程的研究進展”，海洋學報，12卷，2期，20-23。
- Barron C.N., Kara A.B., Hurlburt H.E, Rowley C., Smedstad L.F., 2004: “Sea Surface Height Predictions from the Global Navy Coastal Ocean Model during 1998–2001”, J. of Atmospheric and Oceanic Technology, 21, 1876-1893.
- Blumberg and Mellor G.L., 1987: Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Chapter 1, American Geophysical Union, Washington, D.C, 1-16.
- Jordi, A. and Wang, D.P., 2012: “sbPOM: A parallel implementation of Princeton Ocean Model”, Environmental Modelling & Software, 38, 59-61.
- Mellor, G.L. and Yamada, T., 1982: “Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems”, Rev. Geophys. Space Phys., 20, 851-875.
- Murphy, A.H., 1988: “Skill Scores Based on the Mean Square Error and their Relationships to the Correlation Coefficient”, Mon. Wea. Rev., 116, 2417-2424.
- Murphy, A.H. and Epstein E.S., 1989: “Skill Scores and Correlation Coefficients in Model Verification”, Mon. Wea. Rev., 117, 572-581.

