

應用 WRF 模式於 CALPUFF 模擬效果改善研究

羅國誠¹、林正直¹、洪崇軒²、林旻德³、李自強³、張俊良³、曾德晉⁴

¹空軍航空技術學院一般學科部軍事氣象系

²國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程系

³空軍氣象聯隊

⁴國防大學空軍學院

摘要

本研究以WRF氣象模式施行資料同化後，將其2018年5月2日所模擬氣象場導入CALPUFF空氣品質模式對高屏區域內PM_{2.5}進行擴散模擬與驗證。透過本次研究結果發現，WRF施行四維資料同化後將整體改善高屏空品區域風場、雲量等氣象場的模擬效果，進而提升了CALPUFF在該地區模擬污染物的準確度。CALPUFF污染物同化方法與未同化方法的FB值分別為0.44、0.47，RHCR值分別為1.52、1.63，經過同化後的平均百分比偏差(FB)值與高端值比值(RHCR)值將更接近0和1。代表該同化方式的應用將有助於於CALPUFF模擬結果的改善，後續更可將我氣象聯隊即時監測之區域剖風儀資料導入至模式中加以同化，以提升預報區域氣象場的分析結果更貼近實測資料。

關鍵字：WRF、CALPUFF、PM_{2.5}

一、前言

CALPUFF 是此類模式中最適合用於個別污染源之空氣品質模式，也是美國環保署的推薦模式 (Exponent, 2011)。雖然網格模式也可以模擬這種複雜的傳輸現象，但是網格解析度低，不適用於近距離濃度場之解析。CALPUFF 模式採用三維非穩態拉格朗日擴散理論，在大氣環境評估、大氣規劃等領域得到了廣泛的應用。CALPUFF 模式中包含 CALMET 氣象模組。CALMET 可以導入地面氣象觀測數據、探空(高空)氣象觀測數據、中尺度氣象數值模式(WRF Model)預測數據等。故所需的氣象場，經常以氣象觀測資料的客觀分析獲得，但是受限於海面上及高空的氣象資料不足，難以建全區域性三維風場的合理性 (李, 2008)，而網格模式通常更能在沿海及山區呈現較合理之風場變化(環保署, 2012、2013)。目前大多數的 CALPUFF 應用都是以短期的案例模擬為主 (陳, 2007; 謝, 2010)，主要是受限於氣象資料，然而就法規應用的層面而言，例如空氣品質標準、容許增量限值等，必須有全年的模擬結果才能有法律上的效力。(曠等, 2006) 曾經以 CALPUFF 進行 PM_{2.5} 之全年模擬，然而氣象場是以觀測資料經 CALMET 處理而得。

CALPUFF 的特色

- (一)能模擬從幾十公尺到幾千/百公尺中等尺度範圍。
- (二)能模擬一些非穩態情況(靜/微風、煙、環流、地形和海陸風效應)，亦能評估二次污染顆粒濃度，而以高斯理論為基礎模式(如:ISCST)則不具備此功能。
- (三)目前中尺度氣象數值模式(MM5、WRF)其模擬網格風場與氣象要素，均能導入模式中作為觀測數據，或做成該模式模擬之初始風場。
- (四)模式採用地形動力學、坡面流體參數方法對初始風場(實際觀測、模式模擬輸出結果)分析，適合用於粗糙、複雜地形條件下的模擬。
- (五)具備了面源(廠區爆炸/森林大火)其浮力抬升和擴散分析模組。

運用 CALPUFF 模式施行大氣污染模擬時，僅採用地面、探空(高空)數據資料作為原始氣象輸入數據，然而臺灣地區目前的氣象監測站(CWB、EPA)，特別是高空監測氣象站分布較為稀疏(CWB:板橋、花蓮。中華民國空軍:馬公、屏東、綠島)，加上近年的剖風儀垂直風場資料，針對部分地區污染源周邊能獲取的監測資料仍然十分有限，所以數據的代表性會受到一定的影響。特別是地形較為複雜與海陸交界處，僅採用觀測數據難以反映區域的實際氣象特徵，此將影響大氣污染物的模擬預測結果。另一方面在研究過程中針對高屏區域使用了 WRF 中尺度氣象模擬數據，但是並未採用四維同化方法(FDA)對氣象要素進行空/時間上修正。

二、研究方法

(一)天氣概述

根據中央氣象局分析資料指出，2018年5月2日0時(相對地方時8時)，長江流域有一道鋒面系統逐漸南下影響，臺灣位於鋒面前沿的高溫區。而太平洋副熱帶高壓勢力穩定存在，導致臺灣各地晴朗高溫，感受悶熱，山區及東半部有零星降雨(圖1上)。分析屏東機場高空監測斜溫圖發現低層逆溫出現於850 hpa 以下約1250m，其代表低層仍不利於對流(圖1下)。

(二)WRF 模式網格與參數設定

本研究所使用之氣象網格模式為 WRF (Weather Research and Forecasting Model) 3.2.1 版，中尺度氣象模式 WRF 是美國國家大氣研究中心(NCAR)、美國太平洋西北國家研究室(PNNL)、美國國家海洋及大氣管理局(NOAA)等共同開發的新一代中尺度氣象數值模式，該模式輸出結果可為 CALPUFF、CMAQ、CAMX 等空氣污染擴散模式提供大氣流場。

WRF 數值模式施行氣象場模擬時採用四層巢狀網格之設定，各層網格位置如圖 2 所示，此四層網格之水平網格解析度由外而內依序為 81、27、9 及 3 公里，各層之網格點數分別為 60×60 (南北×東西)、66×66

、81×72 及 156×108，在垂直方向上由地面至 100 hPa 設定為 24 層，模式所使用之初始及邊界條件則是來自於 NCAR/NCEP 2.5°×2.5° 再分析資料，資料時間間隔為 6 小時。模式模擬時間範圍始自 2018 年 5 月 2 日 00 L(Local Time)，結束於 2018 年 5 月 2 日 23 L(Local Time)。模擬時所使用之邊界層參數化為 Yonsei University scheme、地面模式(Land Surface Model)為 Noah LSM，並開啟 Urban Canopy Model，輻射參數化則採用 RRTMG scheme，微物理過程採用 WSM6，積雲參數化選項採用 Grell-3(表 1)。同化方式則採用牛頓張馳逼近(nudging)四維同化方法，此方法在於模式預熱階段，在模擬值與觀測值的差值之間存在著一個比例、相協調的強迫項，在模式運行過程中，該項會使得模擬值逐步接近觀測值，並使各氣象參數保持動力平衡，擁有計算量與存儲空間小等優點，主要用於長期氣象場模擬。CALPUFF 模式於化學轉化設定上，分析 SO₂ 以及 NO_x 轉化為硫酸鹽和硝酸鹽形成的二次 PM_{2.5} 其中 O₃ 與 NH₃ 採用了月平均濃度(表 2)。

本研究將引用 WRF 同化方法後，將其高屏區域環保署、民航局(小港機場)以及中華民國空軍(岡山、屏東機場基地)氣象近地面監測數據導入 CALPUFF 模式的模擬研究。模擬時間為 2018 年 5 月 2 日高屏空品區之污染物物種 PM_{2.5} 將以此機制的啟動與否來測試模擬濃度增量的改變。本研究導入地面監測資料，選定高屏區域，探討 CALPUFF 在有無引用 WRF 同化氣象場時污染物分布的差異，與實際監測站資料加以比對討論同化效果是否有助於。本研究將以 WRF 氣象模式所輸出的氣象要素導入 CALPUFF 進行高屏區域 PM_{2.5} 擴散濃度狀況。

(三) WRF 模式模擬效果分析方法

氣溫、風向/速、濕度、雲量等氣象要素是空氣污染擴散模式的重要輸入參數。本研究參考國內外環境評估的評估方法，針對於近地面 2m 高度的氣溫和 10m 高度的風向/風速等地面氣象要素進行檢驗分析，具體引用公式如下所述：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}}$$

$$MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \phi_i$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\phi_i|$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i)^2 \right]^{1/2}$$

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\phi_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

方程式中，R 為相關係數(反映模擬序列和觀測序列之間的線性相關程度)，MB 為平均偏差(反映模擬序列和觀測序列之間的偏差情況)，MAE 為平均絕對誤差(反映模擬序列和觀測序列之間偏差的實際情況)，RMSE 為均方根誤差(反映模擬序列和實際觀測序列之間偏差的平均)，IA 為模擬值與時間觀測值的吻合指數(反映模擬序列和觀測序列之間的趨勢的吻合程度)。P_i、O_i 分別代表第 i 個氣象要素的模擬值和觀測值。 \bar{P} 、 \bar{O} 分別表示全部模擬值和觀測值的平均值，N 為時間樣本總數， ϕ_i 表示第 i 個模擬值和觀測值之間的差值。

表 3 為模擬後的相關統計量表，統計量中，MB、MAE、RMSE 越接近 0，R 和 IA 越接近於 1，說明模擬效果越好。

三、研究結果

(一) CALPUFF 模擬效果評估

本研究採用平均百分比偏差(FB)，高端值比值(RHC)等方法驗證 CALPUFF 模擬值與實測值吻合效果

平均百分比(FB)公式如下：

$$FB = \frac{2(\overline{C_{mod}} - \overline{C_{obs}})}{C_{mod} + C_{obs}}$$

式中 $\overline{C_{mod}}$ 是 CALPUFF 模擬污染物濃度平均值， $\overline{C_{obs}}$ 代表觀測污染物濃度平均值。若 FB 的值越接近 0，代表 CALPUFF 模式模擬值與實際觀測值越接近。

RHC 公式如下

$$RHC = C(n) + [\bar{C} - C(n)] \ln\left(\frac{3n-1}{2}\right)$$

方程式中， $C(n)$ 為排序後第 n 個最大濃度值， \bar{C} 為前 $n-1$ 個最大濃度值的平均值。採用 CALPUFF 模擬值與實際觀測值得 RHC 之比 (RHC_R) 來反映模擬預測的合理性，若 n 設定為 11，則 \bar{C} 代表前 10 個最大濃度的平均值。 RHC_R 比值越接近 1，代表 CALPUFF 模式模擬高濃度值與實際觀測值越相符。FB 方法中 $\overline{C_{mod}}$ 與 $\overline{C_{obs}}$ 取值要求與 RHC 相關，為前 11 個高濃度值的平均值。

(二) 污染物模擬效果分析

CALPUFF 模擬 $PM_{2.5}$ 污染物同化過程中與未同化過程中的 FB 值分別為 0.44、0.47， RHC_R 值分別為 1.52、1.63，經過同化後的 FB 值與 RHC_R 值將更接近 0 和 1。圖 3 表示了四維資料同化前後 $PM_{2.5}$ 模擬逐時與測站實際監測值比對的情況。整體而言同化後模擬結果落在 2 倍誤差線內的比率相對比較多，並且中軸線附近的點多於未同化的方案，表示同化過程中 $PM_{2.5}$ 的逐時濃度模擬結果優於未實施同化方案。

四、結論

(一) 透過本次研究結果發現，WRF 施行四維資料同化後將整體改善高屏空品區域風場、雲量等氣象場的模擬效果，進而提升了 CALPUFF 在該地區模擬污染物的準確度。

(二) CALPUFF 污染物同化方法與未同化方法的 FB 值分別為 0.44、0.47， RHC_R 值分別為 1.52、1.63，經過同化後的 FB 值與 RHC_R 值將更接近 0 和 1。代表該同化

方式的應用將有助於於 CALPUFF 模擬結果的改善，後續更可將我氣象聯隊即時監測之區域剖風儀資料導入至模式中加以同化，提升各區域之氣象場的分析結果更貼近實測資料。

五、參考文獻

行政院環保署，(2017)：中華民國臺灣地區環境保護統計年報，行政院環保署，臺灣。

伯鑫，吳忠祥，王剛，(2014)：CALPUFF 模式的標準化應用技術研究，環境科學與技術，2014，530-534。

曠永銓，周武雄、習良孝(2007)：CALPUFF 模式在臺灣地區的模擬驗證與應用，中興工程季刊，第九十四期，85-96。

謝怡君(2010)，應用 CALPUFF 模式模擬神空氣污染物在新竹科學園區的分佈及趨勢，碩士論文。

U. S. EPA(1992)：Screening Procedures for Estimating the Air Quality Impact of Stationary Sources Revised. EPA-454/R-92-019. U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Research Triangle Park, North Carolina 27711：1-10.

Huang T, Tian C, Zhang K, et al(2015)：Gridded atmospheric emission inventory of 2, 3, 7, 8-TCDD in China. Atmospheric Environment. 108：41-48.

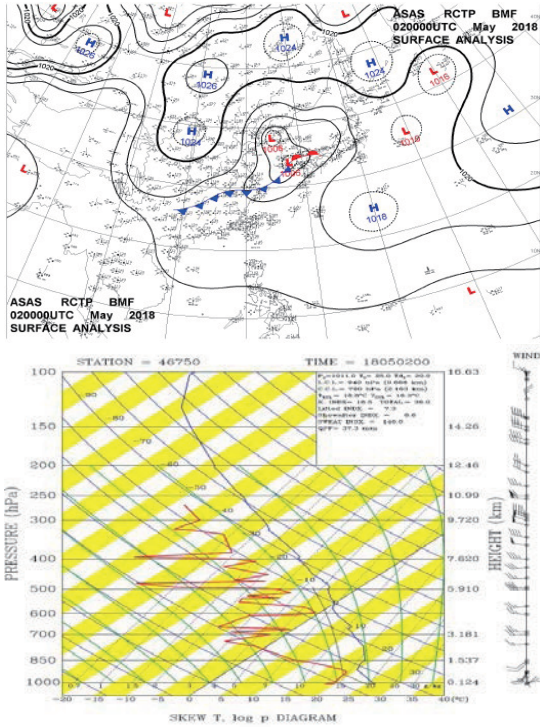


圖 1：中央氣象局天氣圖與屏東機場斜溫圖
(時間：2018 年 5 月 2 日 UTC)

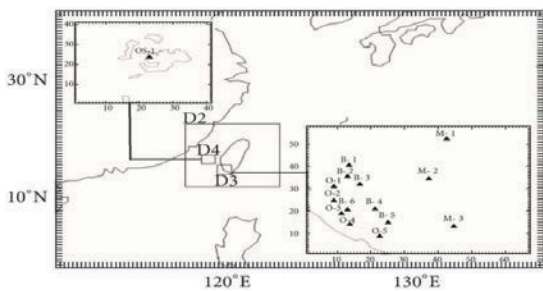


圖 2：WRF 網格暨測站示意圖

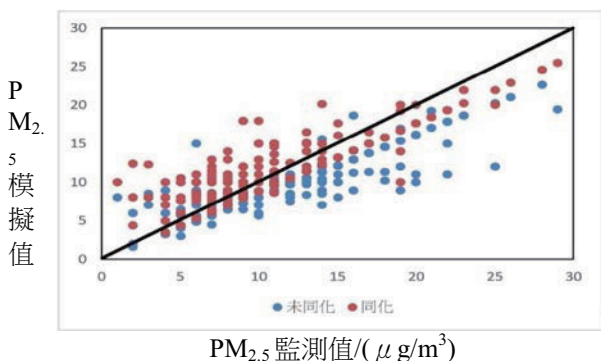


圖 3：同化前後PM_{2.5}模擬濃度值與監測值對比圖

表 1 WRF 參數設定

參數	設置
投影方式	Lambert 投影
網格方法	Two-way feed back
微物理過程	WSM3-class simple ice scheme
短波輻射設定	GODDARD 短波輻射方案
長波輻射設定	RRTM 長波輻射方案
PBL(邊界層) option	Yonsei University scheme
Land option	Noah scheme
積雲對流參數化設定	Grell-3

表 2 CALPUFF 模式主要參數表

參數	設置
化學轉化機制	MESOPUFF II
SO ₂ 夜間轉化率	0.2%/h
NO ₂ 夜間轉化率	2%/h
HNO ₃ 夜間轉化率	2%/h
風速廓綫模式	ISC RURAL
擴散選項	PG&MP

表 3 同化與未同化結果統計指標對比

統計參數	總雲量		10m 風速 / (m/s)		2m 氣溫 / °C	
	同化	未同化	同化	未同化	同化	未同化
R	0.54	0.51	0.58	0.53	0.97	0.96
IA	0.76	0.76	0.71	0.67	0.97	0.97
MB	-0.6	-0.7	0.9	-1.1	-1.1	-1.1
MAE	2.68	2.72	1.64	1.84	2.48	2.51
RMSE	4.12	4.23	2.17	2.45	3.69	3.73
樣本數	72	72	384	384	384	384