

CWB FV3GFS 積雲參數化方案對於西北太平洋颱風模擬之表現

林昌鴻^{1,3} 楊明仁¹ 蕭玲鳳² 陳建河³

國立臺灣大學大氣科學系¹ 中央氣象局科技中心² 中央氣象局氣象資訊中心³

摘要

本研究主要探討 CWB FV3GFS 使用 NSAS(scale-aware New Simplified Arakawa-Schubert) 和 NTDK(new Tiedtke)兩種不同積雲參數化方案，對於西北太平洋颱風模擬之影響。全球模式使用 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 作業模式之再分析資料作為模式初始場，並於 2019 年 8 月每天 00UTC 進行 5 天預報。為了探討不同積雲參數化方案對於東亞地區綜觀天氣之可預報度，本研究針對重力位高度、溫度、緯向風和經向風場之模擬結果，與 ERA5 再分析資料進行比較，並計算預報得分。颱風路徑模擬結果將與 CWB 最佳颱風路徑資料進行比較。由於環境駛流場是主要影響颱風移動方向的主要因素之一，因此本研究計算颱風外圍的厚度平均之流場，探討不同積雲參數化方案對於颱風環境駛流場的掌握度。為了評估模擬的颱風移動速度與移動方向的準確性，我們進一步將颱風路徑誤差拆分成平行與垂直於實際颱風移動路徑的誤差(along-track and cross-track errors)。詳細評估結果將於研討會中呈現。

關鍵字: Tiedtke 積雲參數化方案，颱風模擬，CWB FV3GFS

一、前言

全球模式中的積雲參數化方案，對於大氣環流與環境水氣分布的模擬結果扮演重要腳色。本研究除了探討 CWB FV3GFS 全球模式使用 NSAS 積雲參數化方案進行模擬實驗，另外也參考 MPAS (Model for Prediction Across Scales) 模式與 WRF (Weather Research and Forecasting) 4.0 版本對於 NTDK 積雲參數化方案(Bechtold et al. 2014)的設計，將 NTDK 方案建置於 CWB FV3GFS 全球模式，探討 NSAS 和 NTDK 積雲參數化方案對於夏季(2019 年 8 月)和颱風模擬的掌握度。

二、數值模式與再分析資料

FV3GFS 全球模式源自於 2016 年，由 NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) 發展的有限體積法立方球面座標之全球模式動力核心(Finite-Volume Cubed-Sphere Dynamical Core: FV3)，並結合 NCEP/GFS 的物理參數化方案，包括邊界層(Han et al. 2016)、積雲(Han and Pan 2011; Han et al. 2017)、重力波拖曳(Chun and Baik 1994; Kim and Arakawa 1995; Kim and Doyle 2005)和輻射(Clough et al. 2005)等物理參數化方法，其中只有微物理參數化法由 Zhao and Carr 1997 方案改為使用 Chen and Lin (2011, 2013)方案。

本研究使用 CWB FV3GFS(C384T)全球模式進行模擬實驗，水平解析度大約為 25 公里，垂直層數共 65 層。全球模式以 2019 年 8 月期間與颱風生命期期間(於第四章詳細說明)，每天 00UTC 的

NCEP/FV3GFS 再分析資料作為模式初始場。為了探討 CWB FV3GFS 全球模式使用 NSAS 積雲方案與新建置的 NTDK 方案對於模擬結果的差異，物理參數化方案的選擇與原始作業版本相同，僅改變積雲參數化方案的設定。

模式診斷校驗與模擬結果分析的部分，本研究使用 ERA5 再分析資料之比濕、水平風、溫度和垂直速度場，以及 GPM 衛星觀測降水資料進行比較。ERA5 再分析資料水平解析度約 30 公里，垂直層數由地表至高度 80 公里共有 137 層，時間解析度為 1 小時。GPM 衛星觀測降水資料水平解析度為 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，時間間距為 3 小時。

三、全球模式診斷校驗

為了診斷 CWB FV3GFS 全球模式由原本使用 NSAS 積雲參數化方案的設定，改為使用新建置的 NTDK 積雲參數化方案後，對於夏季東亞地區綜觀尺度系統模擬結果的表現與差異，本研究分別使用 NSAS 方案和 NTDK 方案對 2019 年 8 月份期間，每天的 00UTC 執行 5 天的預報，並針對水氣、溫度、水平風和重力位高度場的模擬結果與 ERA5 再分析資料進行比較。由東亞範圍平均的水氣偏差與均方根誤差校驗結果可知，CWB FV3GFS 使用 NTDK 方案後，相較於使用 NSAS 方案，可修正位於低層大氣的乾偏差厚度，以及中層大氣的濕偏差厚度，但濕偏差的極大值卻明顯較 NSAS 方案的偏差要多。

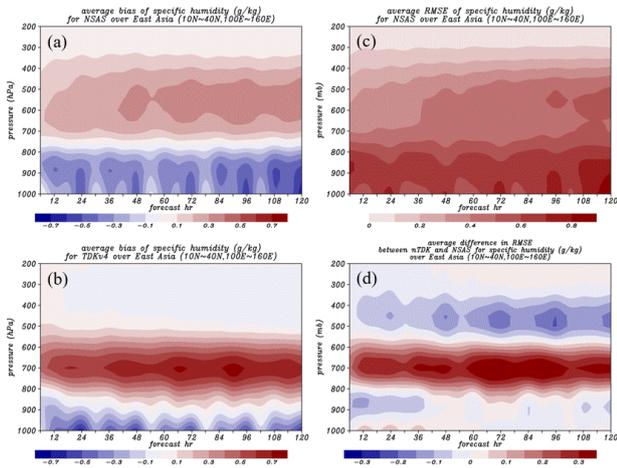


圖 1、CWB FV3GFS 使用 NSAS 方案和 NTDK 方案模擬 120 小時期間之比濕 q (g/kg)，於東亞地區平均 ($10^{\circ}N \sim 40^{\circ}N, 100^{\circ}E \sim 160^{\circ}E$) 之相較於 ERA5 再分析資料的偏差(BIAS)與均方根誤差(RMSE)之垂直分布圖。(a)、(b)分別為 NSAS 方案和 NTDK 方案的平均偏差，(c)為 NSAS 方案的平均 RMSE，(d)為 NTDK 方案和 NSAS 方案之平均 RMSE 的差異(NTDK-NSAS)。

溫度場校驗結果(圖 2)顯示，使用 NSAS 方案(圖 2a)於 120 小時預報期間，整層大氣相較於 ERA5 再分析資料皆有暖偏差的現象，僅 925 hPa 高度出現冷偏差，而暖偏差主要出現於高層大氣約 400hPa~200hPa 之間。將積雲參數化方案改為 NTDK 方案後(圖 2b)，600hPa 以下的中低層大氣轉為冷偏差，而 600hPa 以上高層大氣相較於 NSAS 方案有更為明顯的暖偏差(暖偏差厚度較 NSAS 方案為厚)。將 NTDK 方案與 NSAS 方案的溫度平均 RMSE 相減後(NTDK-NSAS)，呈現 NTDK 方案於預報 42 小時以內，整層大氣的溫度 RMSE 相較於 NSAS 方案為低，但是當預報 48 小時之後，於 700hPa 以上出現明顯的溫度誤差，尤其是在 200hPa 高度位置，相差 0.5K 以上。

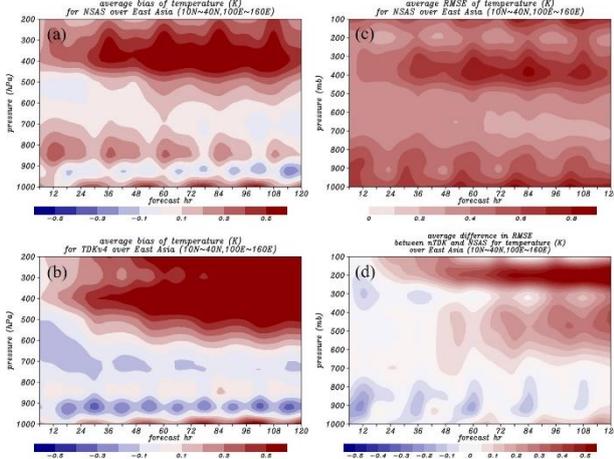


圖 2、同圖 1，但為溫度 T (K)之校驗結果。

高度場平均偏差分布圖(圖 3a 與圖 3b)中，CWB

FV3GFS 全球模式使用 NSAS 方案和 NTDK 方案於 120 小時模擬期間，皆呈現 200hPa 高度之下氣壓場有偏低的現象，並且隨著預報時間負偏差厚度有提高的趨勢；高層 200hPa 高度則有偏高的現象。NSAS 方案模擬的高度場平均 RMSE 分布(圖 3c)與偏差分布圖(圖 3a)類似，主要的高度場平均誤差位於低層大氣，並且隨著預報時間誤差往高層延伸。由 NTDK 方案與 NSAS 方案之間的高度場平均 RMSE 差異結果(圖 3d)，顯示使用 NTDK 方案於 300hPa 高度以下的誤差較大，並配合偏差分布圖可知(圖 3b)，NTDK 方案對於夏季東亞地區的平均氣壓值相較於 NSAS 方案，會有偏低的現象。

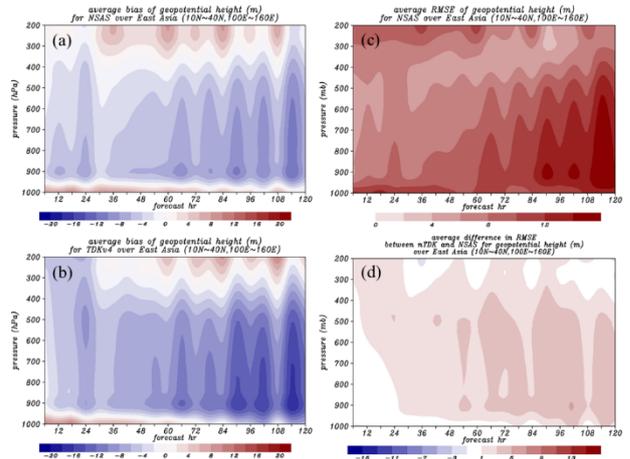


圖 3、同圖 1，但為重力為高度場 H (m)之校驗結果。

在水平風場校驗結果中(圖 4 與圖 5)，NSAS 方案與 NTDK 方案(圖 4a 與圖 4b)在緯向風場的平均偏差有相似的分布，低層大氣主要為西風偏差，並隨著時間往高層延伸，而在高層大氣轉為東風偏差。經向風場的部分，NSAS 方案於 120 小時預報期間，皆呈現低層南風、高層北風偏差的特徵。NTDK 方案後大約於 48 小時之內，偏差分布與 NSAS 方案相同，但是在模擬 48 小時之後，高層北風偏差的位置逐漸往低層移動，造成在模擬 84 小時之後，偏差分布轉為低層北風，高層南風偏差的現象。比較 NTDK 方案和 NSAS 方案的水平風場平均誤差(NTDK-NSAS)，NTDK 方案於 120 小時模擬時間，水平風場於整層大氣的誤差皆相較於 NSAS 方案為大，顯示 CWB FV3GFS 使用 NTDK 方案對於東亞地區平均的水平風場掌握度較 NSAS 方案為低。

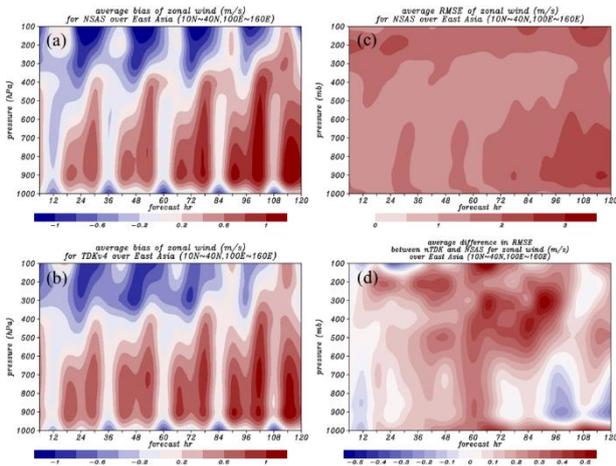


圖 4、同圖 1，但為緯向風場 U (m/s)之校驗結果。

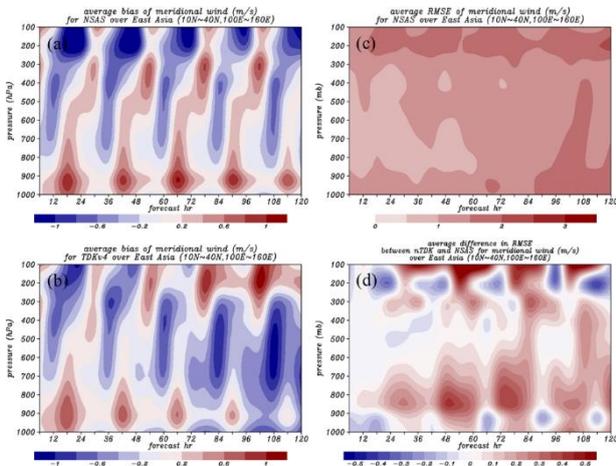


圖 5、同圖 1，但為經向風場 V (m/s)之校驗結果。

圖 6 為 NSAS 方案與 NTDK 方案於 2019 年 8 月每天的 00Z，於模擬第 5 天平均之 500hPa 高度場和水平風場(圖 6b 與圖 6c)，相較於 ERA5 再分析資料(圖 6a)、NSAS 方案和 NTDK 方案模擬的太平洋高壓(5880 等值線)皆有偏弱的趨勢；位於東經 120 度的槽線系統，則有偏強的趨勢。ERA5 再分析資料顯示月平均的太平洋高壓軸線為西北-東南方向，且可向西延伸至東經 130 度。位於東經 120 度的北方槽線向南延伸大約至北緯 30 度左右(5850 等值線)。NSAS 方案和 NTDK 方案模擬之平均太平洋高壓軸線，則呈現較為南-北方向的分布，高壓分布範圍僅向西延伸至東經 145 度左右，因此造成中低層大氣的重力位高度場出現負偏差，緯向風場出現西風偏差的結果(圖 3a~b 與圖 4a~b)。模擬中的北方槽線南下至臺灣附近，造成經向風場的校驗結果出現北風的偏差(圖 5a~b)。比較 NTDK 方案和 NSAS 方案模擬結果，NTDK 方案模擬的太平洋高壓強度相較於 NSAS 方案有更為偏弱的現象，而北方槽線則有更為偏強的現象，使得 NTDK 方案在東亞地區的重力位高度場和水平風場的誤差相較於 NSAS 方案的誤差為大(圖 3d、圖 4d 與圖 5d)。

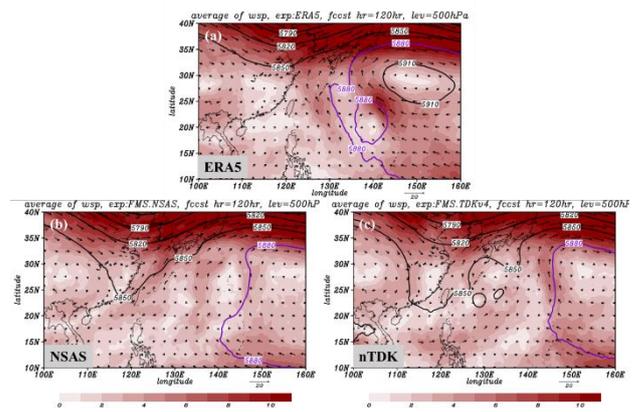


圖 6、2019 年 8 月期間，(a)ERA5 再分析資料之月平均和 CWB FV3GFS 使用(b)NSAS 方案與 (c)NTDK 方案於不同模式初始場時間，模擬第 5 天之平均 500-hPa 高度場(等值線，單位為 m)和水平風場(箭頭，單位為 20 m/s)。紫色等值線代表高度場 5880-m。

四、颱風模擬結果

本研究針對 2017 年至 2019 年期間不同強度分級的北行與西行颱風，於颱風生命期期間進行 5 天預報。探討 CWB FV3GFS 全球模式使用 NSAS 方案和 NTDK 方案對於颱風路徑與結構的掌握度。挑選颱風個案的條件，本研究根據中央氣象局最佳颱風路徑資料，定義颱風在特定區域內(21°N~30°N, 120°E~145°E)颱風移動的北行分量大於西行分量時分類為北行颱風；若颱風在 10°N~30°N, 100°E~160°E 區域內，颱風移動的西行分量大於北行分量時，定義為西行颱風。另外，為了使 5 天模擬結果中，不同颱風的個案數較為一致，挑選的颱風個案生命期需大於 4 天。根據以上條件，本研究挑選 6 個北行颱風(表 1)與 6 個西行颱風(表 2)，其中包含強烈、中度與輕度颱風。

intensity	Typhoons	life periods
Sever tropical storms	安比 (Ampil)	2018-07-18 12:00~2018-07-23 18:00
	丹娜絲 (Danas)	2019-07-16 06:00~2019-07-21 12:00
Typhoon (Moderate Intensity)	玲玲 (Lingling)	2019-09-02 00:00~2019-09-08 00:00
	米塔 (Mitag)	2019-09-28 00:00~2019-10-03 06:00
Typhoon (intense Intensity)	利奇馬 (Lekima)	2019-08-04 06:00~2019-08-12 18:00
	哈吉貝 (Hagibis)	2019-10-05 18:00~2019-10-13 06:00

表 1、6 個北行颱風個案之強度分級、名稱以及生命期。

intensity	typhoons	life periods
Sever tropical storms	白鹿 (Bailu)	2019-08-21 06:00–2019-08-25 18:00
	楊柳 (Podul)	2019-08-27 00:00–2019-08-30 06:00
Typhoon(Moderate Intensity)	天鵝 (Hato)	2017-08-20 06:00–2017-08-24 06:00
	卡努 (Khanun)	2017-10-12 12:00–2017-10-16 06:00
Typhoon(intense Intensity)	瑪莉亞 (Maria)	2018-07-04 12:00–2018-07-11 18:00
	山竹 (Mangkhut)	2018-09-07 12:00–2018-09-17 06:00

表 2、6 個西行颱風個案之強度分級、名稱以及生命期。

為了瞭解颱風預報路徑誤差來源，本研究將颱風路徑誤差進一步拆分成平行與垂直於實際颱風移動方向的路徑誤差(along track error and cross track error)。北行颱風平均路徑預報誤差分析(圖 7a)，顯示 NSAS 方案和 NTDK 方案模擬的北行颱風移動速度較實際颱風移動速度為慢，最大誤差大約為 300 公里，而移動方向的誤差相較於移動速度的誤差為小，模擬的移動方向偏向右側大約 100 公里以內。由此可知，造成模擬北行颱風路徑誤差，主要來自於模擬的颱風移動速度，而 NTDK 方案的總路徑誤差較小，主要來自於颱風移動速度的修正。NTDK 方案在模擬 120 小時以內，颱風移動速度較 NSAS 方案為快，較接近於實際颱風移速，另外在模擬第 78 小時之後，NTDK 方案也修正了 NSAS 方案模擬颱風移動方向的誤差。在西行颱風的部分(圖 7b)，於模擬時間 72 小時以內，造成颱風預報路徑的誤差，主要來自於模擬的颱風移動速度偏慢。72 小時之後，颱風移動方向誤差開始增加，逐漸偏向實際颱風移動方向的右側。NTDK 方案在西行颱風的路徑誤差也小於 NSAS 方案。其誤差修正的原因與北行颱風相同。

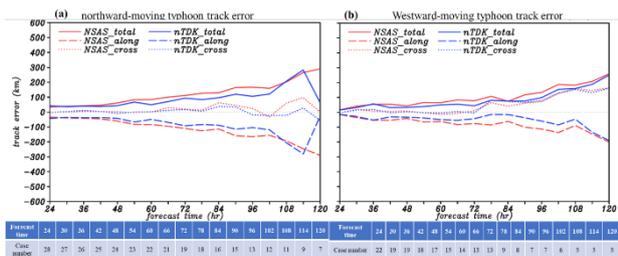


圖 7、NSAS 方案(紅線)和 NTDK 方案(藍線)模擬(a)北行颱風和(b)西行颱風之 cross track error(點線)、along track error(虛線)和 total track error(實線)。圖表為不同預報時間之颱風個案數。

環境的駛流場(steering flow)為影響颱風移動的主要因素(Galarneau and Davis, 2013)，而太平洋高壓環流場為主要影響西北太平洋颱風的駛流場。本研究根據(1)式，計算距離颱風中心 300 公里至 800 公里的厚度平均流場，並進行環狀平均後得到颱風環境的駛流場。

$$steering\ flow = \frac{\int_{1000hPa}^{200hPa} udp}{\int_{1000hPa}^{200hPa} dp} \quad (1)$$

北行颱風平均結果(圖 8a 與圖 8b 藍色實線)顯示 NTDK 方案模擬的颱風駛流場在速度與方向上，於模擬 120 小時期間，絕對誤差大致上皆小於 NSAS 方案的誤差，其中以速度的誤差修正較方向上的誤差修正明顯。此結果與路徑誤差(圖 7a)校驗結果一致。西行颱風的部分，將陸地的影響扣除後，NTDK 方案模擬的環境駛流場速度絕對誤差小於 NSAS 方案，而方向絕對誤差於 72 小時之前，NTDK 方案與 NSAS 方案誤差大小相似，於 72 小時之後絕對誤差稍微大於 NSAS 方案。

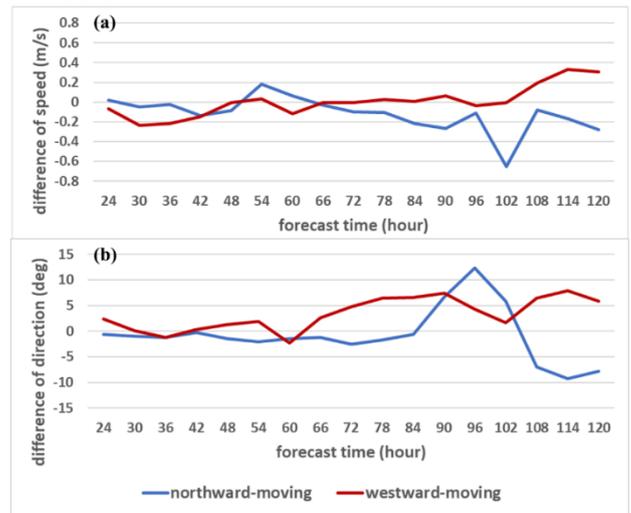


圖 8、NTDK 方案和 NSAS 方案之駛流場(steering flow)絕對誤差(相較於 ERA5)的差異(NTDK-NSAS)。(a)為駛流場之速度的差異(單位為 m/s)，(b)為駛流場之方向上的差異(單位為度)。藍色實線為北行颱風平均結果；紅色實線為西行颱風平均結果。

NSAS 方案與 NTDK 方案對於 12 個颱風結構的模擬表現有類似的趨勢，因此本研究以特徵較為明顯的哈吉貝颱風進行討論。圖 9 為哈吉貝颱風在發展至成熟階段時，距離颱風中心 300 公里以內的厚度平均流場(1)式。透過厚度平均流場的水平結構分析，顯示 NSAS 方案的颱風水平風速明顯大於 ERA5 再分析資料，且風場結構較為對稱，強風速範圍(水平風速 >45 m/s)幾乎呈現環狀分布。NSAS 方案模擬的颱風眼大小也明顯小於 ERA5 再分析資料的結果。而 NTDK 方案則相較於 NSAS 方案較為接近 ERA5 再分析資料。NTDK 方案模擬的水平風速低於 NSAS 方案，且強風範圍位於哈吉貝颱風的第一和第四相位之間，與 ERA5 再分析資料較為類似。但 NTDK 方案模擬的颱風眼明顯相較於 ERA5 再分析資料有過大的現象。

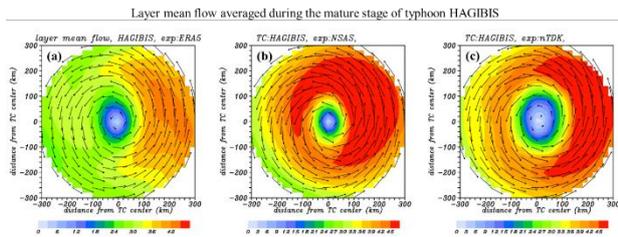


圖 9、(a)ERA5 再分析資料於哈吉貝颱風成熟階段(2019 年 10 月 10 日 00Z)之厚度平均流場，以及 CWB FV3GFS 使用(b)NSAS 方案和(c)NTDK 方案，於不同初始場時間模擬之哈吉貝颱風發展至成熟階段的時間與厚度平均之流場(m/s)。顏色部分代表速度場(m/s)；箭頭部分代表風向(30-m/s)。

圖 10 為 CWB FV3GFS 全球模式在不同初始場時間，模擬哈吉貝颱風發展至成熟階段時，對颱風範圍內最大降雨量的位置進行 40 度方位角平均，得到時間與方位角平均的徑向風(m/s)、切向風(m/s)、垂直速度(100 m/s)與相當位溫(equivalent potential temperature; 單位為 k)。在颱風切向風與徑向風分析的部分(圖 10a~c)，NSAS 方案(圖 10b)相較於 NTDK 方案(圖 10c)與 ERA5 再分析資料(圖 10a)，有最強的切向風速，颱風發展較強。受切向風阻隔影響，徑向風入流的範圍最小，位於低層大氣 800hPa 高度之下，距離颱風中心 150 公里以外的區域。由 NTDK 方案的切向風垂直分布，顯示 NTDK 方案模擬的哈吉貝颱風相較於 ERA5 資料與 NSAS 方案模擬有較大的颱風眼結構，此結果與厚度平均流場分析(圖 9)相同。另外，因為 NTDK 方案模擬的切向風速較 NSAS 方案為弱，徑向風入流可延伸至距離颱風中心約 110 公里處。颱風垂直速度場與相當位溫垂直分布顯示，ERA5 再分析資料相較於 NSAS 方案和 NTDK 方案，高層大氣有較大的垂直速度，但是在水平風場分析(圖 9 與圖 10a~c)中，卻顯示 ERA5 再分析資料的哈吉貝颱風強度較 CWB FV3GFS 的模擬結果強度為弱。猜測是因為 ERA5 模式的垂直層數較 CWB FV3GFS 全球模式多，因此可解析出較強的垂直速度場。比較 NSAS 方案與 NTDK 方案模擬結果，NSAS 方案模擬的颱風強度發展較強，呈現出較強的垂直速度場與明顯的暖心結構特徵。

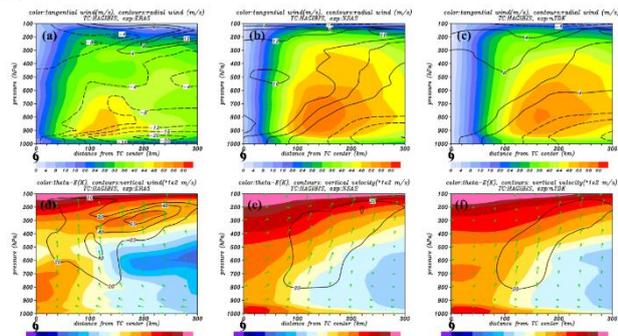


圖 10、(a),(d)ERA5 再分析資料於哈吉貝颱風成熟階段(2019 年 10 月 10 日 00Z)，以及 CWB FV3GFS 使用(b),(e)NSAS 方案和(c),(f)NTDK 方案於不同初始場時間模擬哈吉貝颱風發展至成熟階段的時間與方位角平均之垂直剖面圖。(a)~(c)為徑向風(等值線，負值代表向颱風中心入流；正值代表向颱風外圍出流，單位為 m/s)和切向風(顏色部分，單位為 m/s)。(d)~(f)為相當位溫(顏色部分，單位為 K)和垂直速度(等值線，單位為 100 m/s)。

CWB FV3GFS 全球模式在使用 NSAS 積雲參數化方案時，於模擬時間初期，颱風強度會有迅速增強的趨勢。在積雲參數化方案的設定改為 NTDK 方案後，颱風發展的趨勢會較趨近於 ERA5 再分析資料的結果。以初始場時間 2019 年 10 月 07 日 00Z 模擬的哈吉貝颱風結果為例(圖 11)，在經過 40 度方位角平均的 850hPa 切向風 Hovmöller 時序圖中，NSAS 方案的模擬結果(圖 11b；顏色部分)，則呈現出 850hPa 的最大切向風速區於模擬時間 00~24 小時期間，便由颱風半徑大約 110 公里處逐漸往颱風中心內縮至 50 公里的位置，並於 10 月 8 日 00Z 切向風速開始逐漸增強，一直到 10 月 10 日 00Z 颱風強度達到成熟之後開始逐漸減弱。NTDK 方案雖然在模擬初期 00~24 小時期間切向風也有增強並內縮的現象，但在模擬 24 小時之後，最大切向風速區開始向外調整至颱風半徑大約 200 公里處，眼強位置較接近於 ERA5 再分析資料。在 10 月 9 日 00Z 最大切向風速區再次往颱風中心內縮並且增強，於 10 月 10 日 00Z 颱風強度達到成熟後逐漸減弱。

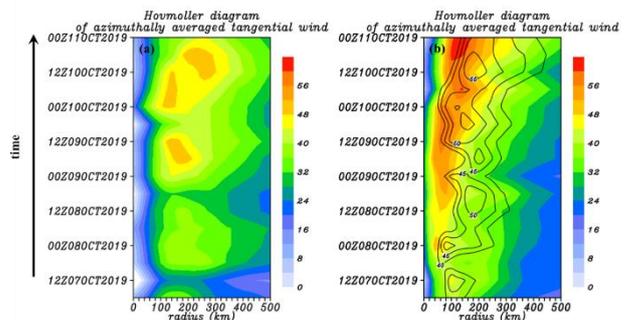


圖 11、哈吉貝颱風於 2019 年 10 月 7 日 00UTC 至 2019 年 10 月 11 日之 850hPa 切向風(m/s)Hovmöller 時序圖。(a)為 ERA5 再分析資料，(b)為 CWB FV3GFS 使用 NSAS 方案(顏色部分)和 NTDK 方案(等值線)模擬結果。

五、結論

全球模式的綜觀尺度診斷校驗結果中，CWB FV3GFS 全球模式在使用 NTDK 方案後，對於 2019 年 8 月期間東亞地區(10°N~40°N, 100°E~160°E)範

圍的四個重要氣象變數(水平風、溫度、重力位高度、水氣場),相較於 ERA5 再分析資料的誤差,普遍都比使用 NSAS 方案的誤差為大。造成此結果的原因,是因為 NTDK 方案相較於 NSAS 方案模擬的西北太平洋高壓偏弱(造成較大的西風偏差),且槽線系統發展偏強(造成較大的北風偏差),使得北風將冷空氣平流至南方的作用增加,導致東亞地區於中低層大氣有明顯的冷偏差現象。

NTDK 方案雖然在東亞地區的綜觀天氣尺度模擬表現低於 NSAS 方案,但是對於 12 個包含不同強度的北行或西行颱風個案中,NTDK 方案可降低 NSAS 方案模擬的颱風路徑平均誤差。將颱風路徑誤差拆分成颱風移速與颱風移動方向誤差的分析,顯示 NTDK 方案主要修正了 NSAS 方案對於颱風移速偏慢的現象。環境駛流場與颱風結構的掌握度方面,NTDK 方案皆相較於 NSAS 方案更為接近於 ERA5 再分析資料結果,而 NSAS 方案模擬的颱風強度有明顯偏強的趨勢。由模擬第 5 天(模式初始場時間為 2019 年 10 月 6 日)的 500hPa 重力位高度場與流場水平分布圖(圖 12),比較 NSAS 方案和 NTDK 方案模擬結果,顯示 NTDK 方案模擬的哈吉貝颱風和太平洋高壓強度與 ERA5 再分析資料較為相似,使得西北太平洋高壓環流提供的環境駛流場與颱風交互作用後,NTDK 方案模擬的哈吉貝颱風的路徑誤差小於 NSAS 方案。但是 NTDK 方案模擬位於華南地區的高壓強度明顯相較 ERA5 資料與 NSAS 方案為弱,且北方槽線系統也明顯偏強。這可能是導致 NTDK 方案在東亞範圍平均後的預報分數低於 NSAS 方案,但是颱風預報路徑誤差卻小於 NSAS 方案的原因。

color: wind speed (m/s), contours: geopotential height (m),
lev:500 hPa, T=2019-10-10 00Z

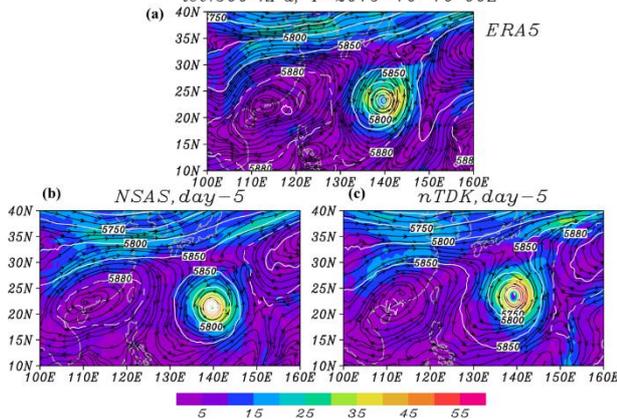


圖 12、(a)ERA5 再分析資料與 CWB FV3GFS 使用 (b)NSAS 方案(c)和 NTDK 方案於初始場時間 2019 年 10 月 06 日預報第 5 天之風速(顏色部分,單位為 m/s)、重力位高度(等值線,單位為 m)和流線場(streamline)。白色虛線為重力位高度場 5880 (m)等值線。

六、參考文獻

- Bechtold, P., N. Semane, P. Lopez, J.-P. Chaboureau, A. Beljaars, and N. Bormann, 2014: Representing equilibrium and nonequilibrium convection in large-scale models. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 734–753.
- Chen, J. H., and S. J. Lin, 2011: The remarkable predictability of inter-annual variability of Atlantic hurricanes during the past decade. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L11804.
- Chen, J. H., and S. J. Lin, 2013: Seasonal predictions of tropical cyclones using a 25-km-resolution general circulation model. *J. Climate*, **26**, 380–398
- Clough, S. A., M. W. Shephard, E. J. Mlawer, J. S. Delamere, M. J. Iacono, K. Cady-Pereira, S. Boukabara, and P. D. Brown, 2005: Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **91**, 233–244.
- Galarneau, T. J. and Davis, C. A.: Diagnosing forecast errors in tropical cyclone motion, *Mon. Weather Rev.*, **141**, 405–430, 2013.
- Han, J., W. Wang, Y. C. Kwon, S.-Y. Hong, V. Tallapragada, and F. Yang, 2017: Updated in the NCEP GFS cumulus convection schemes with scale and aerosol awareness. *Wea. Forecasting*, **32**, 2005–2017.
- Han, J., and H.-L. Pan, 2011: Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP global forecast system, *Wea. Forecasting*, **26**, 520–533.
- Kim, Y.-J., and A. Arakawa, 1995: Improvement of orographic gravity wave parameterization using a mesoscale gravity wave model. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1875–1902.
- Kim, Y.-J., and J. D. Doyle, 2005: Extension of an orographic-drag parametrization scheme to incorporate orographic anisotropy and flow blocking. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 1893–1921.
- Zhao, Q., and F. H. Carr, 1997: A prognostic cloud scheme for operational NWP models. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 1931–1953.