

# 修正 CWB FV3GFS 模式積雲參數化方案對梅雨鋒預報之研究

林昌鴻<sup>1,3</sup> 楊明仁<sup>1</sup> 蕭玲鳳<sup>2</sup> 陳建河<sup>3</sup>

國立臺灣大學大氣科學系<sup>1</sup> 中央氣象局科技中心<sup>2</sup> 中央氣象局氣象資訊中心<sup>3</sup>

## 摘要

為了改進 CWB FV3GFS 全球模式使用對於中小尺度對流系統的掌握度，本研究計主要參考 Han et al. 2020 的方法，修改 CWB FV3GFS 全球模式內 NSAS (New Simplified Arakawa - Schubert; Han et al. 2017) 積雲參數化方案的物理參數化過程，並探討各物理過程的修改項目對於 2020 年 5 月梅雨鋒面個案模擬的影響。根據計算降水預報得分、鋒面雨帶水平分佈和系統垂直結構分析，顯示修改積雲對流激發條件、增加環境乾空氣逸入率，以及尺度明瞭對流參數化方法(scale-aware parameterization)的更新，可以明顯地改進作業版本的 NSAS 參數化方案產生的降水預報系統性誤差(弱降水發生頻率過高且強降水發生頻率過低)。修改物理過程的項目中，尺度明瞭對流參數化方案(scale-aware parameterization)的調整，對於模擬梅雨鋒面雨帶的改進最為明顯，此方案可以合理地掌握了位於鋒面雨帶強降水發生的位置與降水強度，以及對流系統隨時間發展的特徵。此外，本研究進一步評估積雲物理過程的修正，對於 CWB/FV3GFS 全球模式掌握綜觀天氣的影響。詳細校驗結果將於研討會中呈現。

關鍵字: CWB FV3GFS、積雲參數化方案、scale-aware parameterization

## 一、前言

Han et al. (2020) 針對 Korean Integrated Model (簡稱為 KIM) 全球模式的預報偏差(見表 1；將於第三章中詳細說明)，進行 NSAS 積雲參數化方案的調整與更新，並將此改進後的積雲參數化方案命名為 KSAS 方案。中央氣象局全球模式所使用的 NSAS 積雲參數化方案，也有出現類似於 KIM 全球模式的預報偏差表現。因此，本研究主要參考 Han et al. (2020) 的研究方法，調整 NSAS 積雲參數化方案的細部物理過程，進而改進中央氣象局全球模式使用 NSAS 積雲方案對於中尺度天氣系統(如梅雨鋒面)的整體預報表現。

## 二、數值模式與再分析資料

本研究使用 CWB/FV3GFS(C384T)全球模式進行模擬實驗，水平網格間距大約為 25 公里，垂直層數共有 65 層。CWB/FV3GFS 全球模式使用 00 UTC 的 NCEP/FV3GFS 再分析資料作為模式之初始場。FV3GFS 全球模式源自於 2016 年，由 NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) 發展的有限體積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、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) 微物理參數化法方案。

在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、溫度和垂直速度場資料進行比較。降水觀測資料的部分，本研究使用 GPM 衛星觀測資料以校驗全球模式在東亞(10°N~40°N, 100°E~160°E)的降水模擬表現。ERA5 再分析資料的水平解析度約 30 公里，垂直層數由地表至高度 80 公里共有 137 層，時間間距為 1 小時。GPM 衛星觀測降水資料的水平解析度為 0.1° × 0.1°，時間間距為 1 小時。

根據 Han et al. (2020) 文章中描述，KSAS 積雲參數化方案的原始碼已建置於 2018 年釋出的 WRF 4.0 版本中。因此，本研究參考 NCAR (National Center for Atmospheric Research) 網站上公開的 WRF 4.0 版本程式碼，比較 KSAS 方案與 CWB/FV3GFS 全球模式的 NSAS 積雲參數化方案在程式碼設計的差異，並對照 Han et al. (2020) 對於更新積雲物理過程的描述，逐一將各個更新後的物理過程的程式碼，套用至 NSAS 積雲參數化方案，以探討每一項物理過程的調整，對於全球模式預報的影響。

## 三、實驗結果

表 1 為 Han et al. (2020) 文章中總結 KIM 全球模式的系統性偏差，以及針對每一項目進行 NSAS 積雲參數化方案的調整。KIM 全球模式的系統偏差，包含 (1) 模式傾向於產生過多偏弱的降水預報; (2) 位於熱帶地區的雲量有過度預報的情形，將導致地表短波輻射過少; (3) 午後對流降水發生時間過早; (4) 熱帶對流層頂的風速過低; 及 (5) 模式解析度提高後，造成傳統積

雲參數化方案不再適用的問題。

Han et al. (2020)針對這些模式誤差，進行 NSAS 方案的更新項目，包括(a)根據邊界層內的相對濕度來判斷對流激發的條件；另外(b)增加環境乾空氣逸入率，使得發展較弱的積雲被抑制後，減低弱降水的預報偏差；(c)修改雲水/雲冰轉換為降水/降雪的自動轉換公式，當溫度低於 0°C 時自動轉換係數隨著溫度下降而減少，使模式中雲量增加而減少地表短波輻射通量；(d)考慮邊界層的過程對於環境不穩定度的影響，使得模式更合理的掌握午後對流發生的時間與對流發展強度；(e)根據雲解析模式結果，修改積雲動量傳輸公式中的動能耗散項，使得高層風速增加；(f)透過判斷對流上衝流的範圍與網格大小之間的比例，降低積雲參數化方案對於模式之調整，進而達到尺度明瞭之對流參數化方案(scale-aware parameterization)。

本研究將探討各物理過程的修改，逐一套用至 CWB/FV3GFS 的 NSAS 積雲參數化方案後(替換後的實驗名稱如表 1 的右欄所示)，討論其對梅雨鋒面個案模擬的影響。每一項實驗皆對於 2020 年 05 月 14 日至 2020 年 05 月 23 日進行模擬測試，每天的 00 UTC 為模式的初始場，並進行 5 天的預報實驗。

Issues in KIM model	modifications	EXP.
excessive light precipitation	a. moisture-based trigger threshold	TRIG
	b. enhanced entrainment in drier environments	ENTR
less incoming solar radiation over the tropical oceans	c. autoconversion from cloud condensate to convective precipitation	AUTC
earlier timing of the afternoon peak in precipitation over land	d. closure considering boundary layer forcing	CLOS
negative wind speed bias in the tropical upper troposphere	e. convective momentum transport	MOMT
Scale-aware cumulus parameterization	f. increase the sensitivity to the convective updraft fraction	SCAL

表 1: Han et al. (2020)文章中提出在 KIM 全球模式的系統偏差(左邊欄位)，並對 NSAS 積雲參數化方案進行修改的項目(中間欄位)，以及本研究所使用的實驗名稱(右邊欄位)。

根據梅雨鋒面個案實驗結果，修改對流激發條件(TRIG)、空氣逸入率(ENTR)和尺度明瞭參數化方案(SCAL)，可提高降水預報得分。因此，本文於下一章節中將詳細說明此三個物理過程修改的方法與模擬結果。其它物理過程的修改，包含準平衡假設考慮邊界層作用(CLOS)、雲水自動轉換率(AUTC)以及對流動量傳輸(MOMT)，對於梅雨鋒面個案模擬結果則沒有明顯的改進(圖 1e~g)。

## (1)、對流激發過程

在 NSAS 積雲參數化方案中，定義空氣塊自近地面開始抬升的高度層(convection starting level; CSL)上升至自由對流面(level of free convection; LFC)之間的厚度，必須小於某個臨界厚度(critical depth; 數值介於

120~180 hPa); 若抬升厚度大於此臨界厚度，代表環境的對流抑制能(convection inhibition; CIN)可能較大，將不利於對流發展。臨界厚度的定義，考慮了位於雲底高度的環境大尺度垂直速度。若環境垂直速度越大，臨界厚度越小，代表環境條件越容易激發深對流發展；反之，則臨界厚度越大，環境不利於深對流發展。

在副熱帶高壓的綜觀環境條件下，即使低層大氣可能存在熱力不穩定度，產生向上的垂直速度場；但是近地面環境濕度較低，仍然不利於深對流發展。因此，KSAS 方案將臨界厚度的定義，改為考慮對流開始高度(CSL)至自由對流面高度(LFC)之間平均相對濕度(RH)的變化；若平均相對濕度越低，則模式會抑制深對流的發展。另外，更新後的深對流激發條件(trigger condition)，則加入了模式網格間距( $\Delta x$ )的影響。隨著網格間距減小，臨界厚度越低，而限制積雲參數化方案激發深對流的過程。

圖 1 為 2020 年 05 月 22 日 GPM-IMERG 衛星觀測的降水資料(圖 1a)，以及 CWB/FV3GFS 模式作業版本的 NSAS 參數化方案(圖 1b)與替換對流激發條件的實驗(TRIG 實驗; 圖 1c)所預報第三天的日降雨量(mm/day)。其他初始時間的模擬也有類似結果，因此本文以梅雨鋒面達成成熟時期的時間(2020 年 05 月 22 日)進行討論。GPM-IMERG 衛星觀測資料顯示梅雨鋒面於此時間位於台灣南部地區，並呈現西南-東北方向的雨帶分布，另外在鋒面南端有旺盛的中尺度對流系統(mesoscale convective system; MCS)發展。NSAS 實驗模擬的梅雨鋒面移動速度較 GPM-IMERG 衛星觀測的梅雨鋒面為慢，模擬鋒面雨帶位於台灣北部外海，且降水強度有明顯低估的現象。將對流激發條件替換後，TRIG 實驗雖然在鋒面位置模擬沒有明顯的調整，但是明顯增加了鋒面雨帶的降水強度，特別是鋒面南端的中尺度系統發展，並且合理地掌握到 MCS 的生成位置。

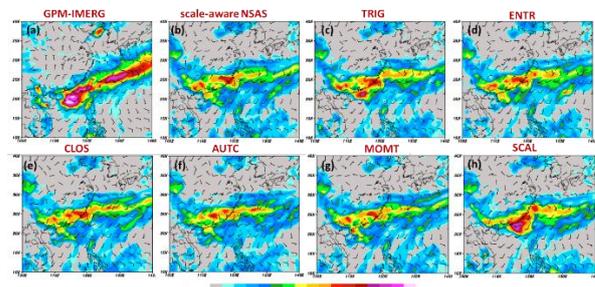


圖 1: 於 2020 年 05 月 22 日 00Z 之(a) GPM-IMERG 衛星降水觀測資料與 ERA5 850-hPa 水平風場(m/s)，以及 CWB/FV3GFS 使用(b)NSAS 方案、(c) TRIG、(d) ENTR、(e) CLOS、(f) AUTC、(g) MOMT 和 (h)SCAL 實驗於預報第三天之日降雨量(mm/day)與 850-hPa 水平風場(m/s)。

透過計算降水預報得分(圖 2)，偏差得分(Bias Score)

顯示 TRIG 實驗可以明顯降低 NSAS 方案高估小雨 ( $\leq 10$  mm/day) 的發生頻率, 以及降水系統發展偏弱(低估大雨( $\geq 20$  mm/day)發生頻率)的誤差。其他預報得分例如 Threat Score (TS)、Probability Of Detection (POD)、False Alarm Ratio (FAR)的比較, NSAS 實驗結果與 TRIG 實驗結果則無明顯差異, 因此本文僅呈現偏差得分的結果。

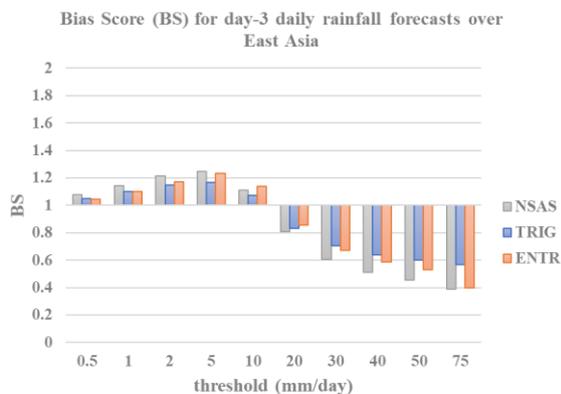


圖 2: 2020 年 05 月 14 日至 2020 年 05 月 23 日 00Z 期間, NSAS 方案、TRIG 與 ENTR 實驗於預報第 3 天在東亞地區( $10^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$ )平均之日降雨量(mm/day), 相較於 GPM-IMERG 衛星降水觀測資料的偏差得分(Bias Score)。

## (2)、增加環境乾空氣逸入率

環境乾空氣的逸入作用(entrainment effect), 主要影響深對流雲的生成與發展。NSAS 積雲參數化方案的深積雲上衝流逸入率, 根據 Bechtold et al. (2008) 2 式的定義, 當環境濕度(RH; Relative Humidity)越高, 環境空氣逸入率越低; 反之, 當環境濕度越低則逸入率越大。在 KSAS 參數化方案中, 為了抑制積雲對流發展, 以校正過度預報弱降水發生頻率的偏差, Han et al. (2020)將環境乾空氣逸入率增加 10 倍。增加逸入率後的梅雨鋒面降水模擬結果顯示(圖 1d), ENTR 實驗預報鋒面雨帶前緣的弱降水範圍( $< 15$  mm/day)相較於 NSAS 實驗有明顯的減少; 此外在梅雨鋒面主要雨帶的位置, 強降水( $> 50$  mm/day)的分佈範圍也較 NSAS 實驗的分佈範圍更為廣泛。圖 2 之透過計算 Bias Score 結果, 也顯示出 ENTR 實驗(橘色方條)可以減少 NSAS 實驗(灰色方條)在弱降水的發生頻率, 並增加深對流發展, 使得強降水發生頻率增加。

## (3)、scale-aware parameterization

傳統積雲參數化方案的發展, 主要假設積雲對流發展的面積遠小於模式水平網格面積。當全球模式的網格解析度提高時, 模式可部分解析積雲對流過程時,

傳統積雲參數化方案的假設(積雲對流發展的面積遠小於模式水平網格面積)將不再適用。因此, Arakawa and Wu (2013)於 NSAS 積雲參數化方案中, 加入判斷對流發展的水平面積與網格面積之間的比例, 以降低積雲參數化方案對於模式的調整(scale-aware parameterization)。而判斷次網格積雲對流發展的面積, 主要使用 Grell and Freitas (2014)的方法, 考慮了環境空氣逸入率的大小。

KSAS 積雲參數化方案中, 除了調整上衝流質量通量隨著模式網格面積而改變以外, 另外使用網格尺度與次網格尺度的垂直速度場的比例, 進行質量通量的調整。其它在積雲激發條件, 以及上衝流中的雲水溢出至環境場(DTR)的過程, 也考慮了模式網格面積大小的影響。

將 scale-aware parameterization 方法更新後的梅雨鋒面個案模擬結果(SCAL 實驗)如圖 3, 顯示 SCAL 實驗可明顯改善 NSAS 實驗的鋒面雨帶的掌握程度。在圖 3 中, SCAL 實驗明顯增強梅雨鋒面雨帶的降水強度, 並且可以較為合理地掌握位於鋒面南端的中尺度系統發展的位置, 以及中尺度系統隨時間發展的特徵。鋒面垂直結構分析中(圖 4), 也顯示出 SCAL 實驗(圖 4d)可掌握系統前緣的近地面水平水氣平流強度, 使得鋒面系統中心可發展較 NSAS 實驗(圖 4b)為旺盛的上衝流, 而且上衝流的垂直結構呈現隨著高度向鋒面後方(北方)傾斜的特徵, 此與 ERA5 再分析資料較為一致(圖 4a)。另外, 計算預報第三天的降水預報得分結果中(圖 5), 雖然在 TS、POD 和 FAR 得分方面, NSAS 實驗與 SCAL 實驗沒有明顯的差別, 但是在 Bias Score 呈現出 SCAL 實驗可以明顯降低 NSAS 實驗過度預報弱降水與低估強降水發生頻率的模式偏差, 而且 SCAL 實驗的 Bias Score 在不同降水強度的閾值皆較接近於 1。

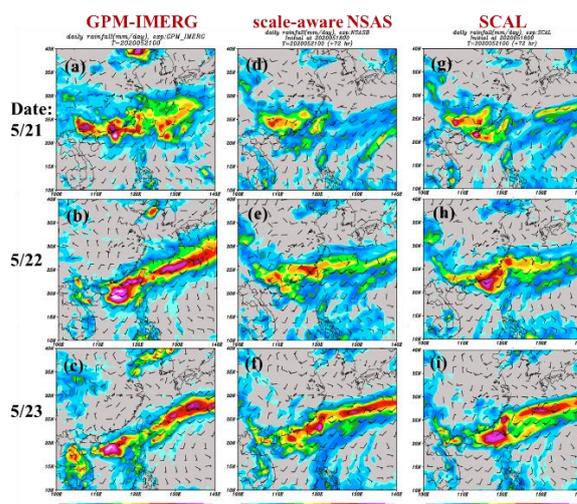


圖 3: 於 2020 年 05 月 21 日至 23 日之(a)~(c) GPM-IMERG 衛星降水觀測資料與 ERA5 850-hPa 水平風場(m/s), 以及 CWB FV3GFS 使用(d)~(f)NSAS 方

案、(g)~(i) SCAL 於預報第三天之日降雨量 (mm/day)與 850-hPa 水平風場(m/s)。

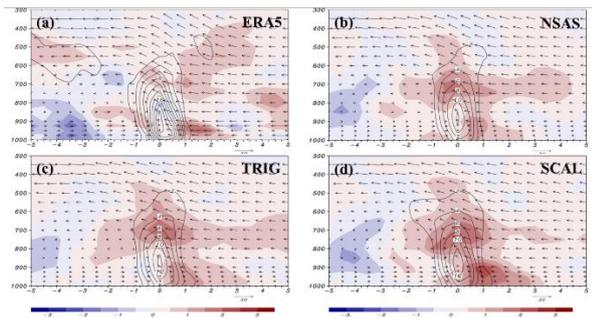


圖 4:梅雨鋒面個案達成成熟期之水氣水平平流(顏色部分,單位為 g/kg/6hr)、相對渦度(等值線,單位為  $10^5 \text{ s}^{-1}$ )與垂直環流(箭頭,單位為 30 m/s)合成分析圖。(a)為 ERA5 再分析資料、(b)~(d)分別為 NSAS、TRIG 與 SCAL 實驗結果

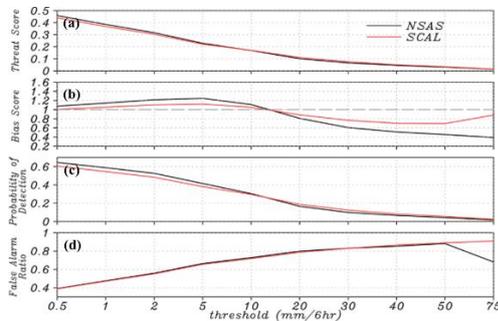


圖 5: 2020 年 05 月 14 日至 2020 年 05 月 23 日 00Z 期間, NSAS(黑色線)和 SCAL(紅色線)於預報第 72~96 小時在東亞地區 ( $10^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$ )平均之 6 小時累積降雨量(mm/6hr),相較於 GPM-IMERG 衛星降水觀測資料之(a)預兆得分(threat score)、(b)偏差得分(bias score)、(c)命中率(probability of detection)與(d)誤報率(false alarm rate)。

NSAS 實驗和 SCAL 實驗的次網格尺度降水與網格尺度降水分析圖(圖 6)顯示,新的 scale-aware parameterization 方法可使積雲參數化方案於主要梅雨鋒面雨帶前緣生成相較於 NSAS 實驗(圖 6b)更為旺盛的積雲對流系統(圖 6d),接著再透過雲微物理參數化方案,於主雨帶位置產生大範圍且強烈的降水分布(圖 6c),使得 SCAL 實驗的總降雨分布與強度較 NSAS 實驗為接近 GPM-IMERG 衛星降水觀測結果(圖 6a)。

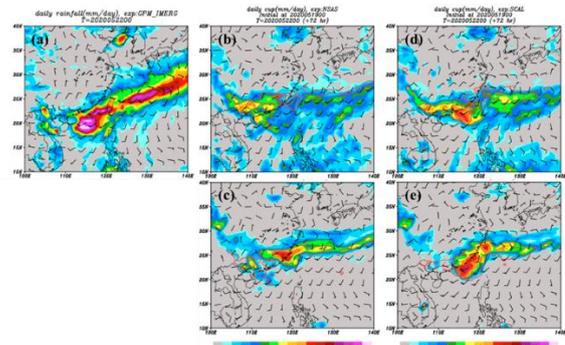


圖 6: (a)為 2020 年 05 月 22 日 GPM-IMERG 衛星降水觀測資料(mm/day)與 ERA5 850-hPa 水平風場(m/s)。(b)、(c)分別為 NSAS 實驗預報第 3 天之次網格尺度降水與網格尺度降水(單位為 mm/day)。(d)、(e)為 SCAL 實驗預報第 3 天之次網格尺度降水與網格尺度降水(單位為 mm/day)。紅色等值線為各實驗的總日降水量,等值線間距為 20(mm/day)。

#### (4)、綜觀天氣診斷校驗

為了進一步評估積雲物理過程的修正,對於 CWB/FV3GFS 全球模式掌握綜觀天氣的影響,本研究結合上述對於梅雨鋒面雨帶有明顯改進的修改項目進行實驗,分別為 SCAL (SCAL+TRIG)實驗,以及 SCEN (SCAL+TRIG+ENTR)實驗。全球模式初始場時間為 2020 年 05 月 14 日至 2020 年 06 月 14 日,總共 31 個初始場時間,並於每天的 00Z 進行 5 天的預報,連續合成 (successive composite) 為一個月的預報結果 (monthly forecast),以獲得長時間具有統計意義的校驗結果。

圖 7 為 NSAS 實驗、SCAL 實驗與 SCEN 實驗預報第 120 小時,針對於東亞地區( $10^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$ )平均之相較於 ERA5 再分析資料的偏差得分(Bias Score)。結果顯示,SCAL 實驗與 SCEN 實驗之間的偏差得分差異並不明顯;相較於 NSAS 實驗而言,SCAL 實驗與 SCEN 實驗主要降低了整層對流層內的比溼(圖 7c)和緯向風場(圖 7d),以及高層大氣的高度場(圖 7a)和溫度場(圖 7b)的偏差。然而,由於 SCAL 實驗與 SCEN 實驗增加了低層大氣(700-hPa 高度之下)的南風偏差,並且在低層大氣的溫度場有更明顯的暖偏差,而高度場上則呈現較大的負偏差。在計算 RMSE 結果中(圖 8),SCAL 實驗與 SCEN 實驗可降低 NSAS 實驗在高層大氣的高度場(圖 8a)和溫度場(圖 8b)的預報誤差(RMSE),但是位於低層大氣的高度場和溫度場,以及高層大氣的水平風場(圖 8d、e)的誤差則有增加的情形。在比溼以及低層大氣的水平風場方面,三個實驗之間的模式誤差沒有明顯差異。

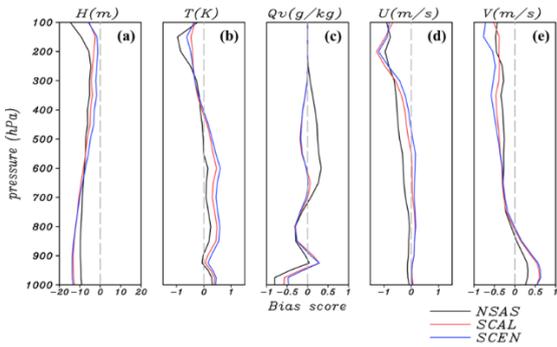


圖 7: NSAS 實驗(黑色線)、SCAL 實驗(紅色線)與 SCEN 實驗(藍色線)模擬第 120 小時之(a)高度場(H; 單位為 m)、(b)溫度場(T; 單位為 K)、(c)比溼(Qv; 單位為 g/kg)、(d)緯向風(U; 單位為 m/s)和(e)經向風(V; 單位為 m/s), 於東亞地區(10°N~40°N, 100°E~160°E)平均之相較於 ERA5 再分析資料的偏差 (Bias Score)。

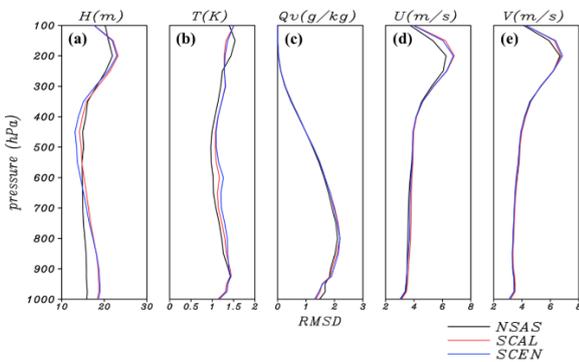


圖 8: 同圖 7, 但為 RMSE 結果。

## 四、結論

為了改進 CWB/FV3GFS 全球模式對於中小尺度對流系統的掌握度, 本研究主要參考 KIM 模式對於積雲參數化方案的更新, 修改 CWB/FV3GFS 全球模式內 NSAS 積雲參數化方案的物理參數化過程, 並探討各物理過程的修改項目對於梅雨鋒面個案模擬的影響。

本研究逐一修改 NSAS 積雲參數化方案物理過程, 透過計算降水預報得分、鋒面雨帶水平分佈和系統垂直結構分析, 顯示修改積雲對流激發條件(TRIG 實驗)、增加環境乾空氣逸入率(ENTR 實驗)以及尺度明瞭對流參數化方案(scale-aware parameterization; SCAL)實驗, 可以明顯地改進原本 NSAS 實驗產生的降水預報系統性誤差(弱降水發生頻率過高且強降水發生頻率過低)。在其他積雲參數化物理過程的調整中, 包含準平衡假設考慮邊界層作用(CLOS 實驗)、雲水自動轉換率(AUTC 實驗)以及對流動量傳輸(MOMT 實驗)等, 則對於梅雨鋒面個案模擬結果沒有明顯的改進(圖 1e~g)。其中, CLOS 實驗對於台灣地區的陸地午後對

流發展的表現, 沒有明顯的影響; 台灣陸地山區午後對流發展機制, 主要與地形抬升和環境風場有關, 而邊界層作用的影響較低。AUTC 實驗雖然可以改善雲量預報, 但由於較多的雲水或雲冰被保留於大氣中, 使得模式地面降水量下降, 無法呈現極端降水現象。MOMT 實驗可增加深對流雲對高層環境風速的影響, 但是 CWB/FV3GFS 全球模式傾向於低估印度洋地區的對流發展, 且高估熱帶海洋大陸地區的對流系統, 使得 MOMT 實驗反而增強了高層風場的模式誤差。

TRIG 實驗將原本的對流激發條件(考慮環境上升速度), 改為考慮環境邊界層內的相對溼度, 進而抑制高壓環境之下及低相對濕度環境的淺對流發展。造成在梅雨鋒面個案實驗結果中, 相較於 NSAS 實驗, TRIG 實驗在位於梅雨鋒面前方(南方)環境的淺積雲對流發展較弱, 使得低層大氣的西南風可有效率地將水氣傳輸至梅雨鋒面系統中心, 讓對流系統發展較為旺盛。ENTR 實驗將環境乾空氣逸入作用增加 10 倍, 使得模式在較乾的環境之下抑制淺對流的發展, 而降低弱降水發生頻率過高的模式偏差。SCAL 實驗則考慮了垂直速度在次網格與網格尺度之間的比例, 改變積雲參數化方案對全球模式的調整程度。修改物理過程的項目中, 尺度明瞭對流參數化方案(scale-aware parameterization)的調整, 為主要改進模式對於梅雨鋒面雨帶的分佈與降水強度發展的模擬結果。

在大尺度天氣系統的診斷分析結果中, SCAL(SCAL+TRIG)和 SCEN(SCAL+TRIG+ENTR)實驗在整體而言沒有明顯地改進 NSAS 實驗在全球模式誤差。其中的原因可能是因為 SCAL 和 SCEN 實驗的對流系統發展較為旺盛, 雲水或雲冰凝結成降水或降雪的過程增加, 在淺熱釋放增加而加熱大氣的影響下, 導致 SCAL 實驗相較於 NSAS 實驗有更為明顯的暖偏差與負值的高度場偏差。因此, 未來將持續探討 SCAL、SCEN 實驗造成淺熱增溫的問題, 以改進積雲參數化方案對於大尺度天氣系統的掌握度。另外, 也將進行西北太平洋颱風個案的模擬實驗, 以了解各物理過程的修改(表 1), 在 CWB/FV3GFS 全球模式對於模擬颱風路徑與結構的影響。

## 四、參考文獻

- Arakawa, A. and C.-M. Wu, 2013: A Unified representation of deep moist convection in numerical modeling of the Atmosphere. Part I. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 1977–1992.
- Bechtold, P., M. Kohler, T. Jung, F. Doblas-Reyes, M. Leutbecher, M. Rodwell, F. Vitart, and G. Balsamo, 2008: Advances in simulating atmospheric variability with the ECMWF model: From synoptic to decadal time-scales. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*,

134, 1337–1351.

- 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
- Chun, H.-Y., and J.-J. Baik, 1994: Weakly nonlinear response of a stably stratified atmosphere to diabatic forcing in a uniform flow. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 3109–3121.
- 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.
- Grell, G. A., and S. R. Freitas, 2014: A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 5233–5250, <https://doi.org/10.5194/acp-14-5233-2014>.
- 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.
- 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.-Y., S.-Y. Hong, and Y. C. Kwon, 2020: The performance of a revised simplified Arakawa-Schubert (SAS) convection scheme in the medium-range forecasts of the Korean Integrated Model (KIM). *Wea. Forecasting*, **35**, 1113–1128.
- 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 .
- Kwon, Y.-C., and S.-Y. Hong, 2017: A mass-flux cumulus parameterization scheme across gray-zone resolutions. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 583–598, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0034.1>.
- Lord, S. J., 1978: Development and observational verification of cumulus cloud parameterization. Ph.D. dissertation, University of California, Los Angeles, 359 pp.
- Pan, H.-L. and W.-S. Wu, 1995: Implementing a mass flux convection parameterization package for the NMC medium-range forecast model. NMC Office Note 409 , 40 pp.
- Zhang, G. J., and X. Wu, 2003: Convective momentum transport and perturbation pressure field from a cloud-resolving model simulation. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1120–1139, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2003\)060,1120:CMTAPP.2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060,1120:CMTAPP.2.0.CO;2).
- Zhao, Q., and F. H. Carr, 1997: A prognostic cloud scheme for operational NWP models. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 1931-1953.