

中央氣象局 103 年天氣分析與預報研討會

呂柏儀 林沛練

中央大學大氣科學系大氣物理所

以 WRF 搭配 Spectral Nudging 進行區域氣候模擬之探討

摘要

全球氣候模式(GCMs)對於局地的區域性天氣特徵受限於解析度不足而難以清楚呈現,但若是使用 GCMs 資料透過動力降尺度方式提供給區域模式,則較能解決 GCMs 無法解析區域和局地氣候變化的問題。然而區域模式在長期連續積分下,有著有著表現隨時間快速變差的情形,針對這個狀況,得以使用短期連續積分並配合重複初始化,抑或是在區域模式中配合使用波譜納進法(Spectral Nudging)減緩此問題。

本研究使用 Weather Research and Forecasting (WRF) 模式,針對 2009 年冬季進行三個月的模擬,將 Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) 0.5°解析度的資料進行動力降尺度,並分為兩個部份進行討論。首先比較四種不同長時間積分方法及 Spectral Nudging 的使用對 15 公里解析度之長期模擬的表現,其次討論高解析度的 5 公里網域下,不同的側邊界資料及 Spectral Nudging 資料來源在區域氣候模擬的影響。

本論文的研究結果顯示,在本篇設定下,長期積分配合 Spectral Nudging 並加入水氣調整之積分方法不僅能維持大尺度流場,模擬的降雨分佈亦能顯著改善且較合理,其表現更優於短期積分。而高解析之內層網格的側邊界及 Spectral Nudging 資料部分,若直接使用全球模式之分析場,不論降雨或其他變數的模擬表現都較好,同時也可以較準確的模擬出溫度及氣壓的日夜變化。綜合而言,使用 Spectral Nudging 進行區域氣候模擬能顯著減少區域模式在大尺度流場帶來的誤差,進而模擬出較合理的區域氣候特徵。

關鍵字：Spectral Nudging

一、前言

世界各地的氣象中心目前已發展許多 General Circulation Models (GCMs),將世界各地觀測資料放入模式,經計算、同化、參數化等方式,最終得到一個得以代表全球性氣候資訊的資料。然而受限於計算資源限制,解析度較低的 GCMs 會導致區域性氣象資訊不足。但若使用 Regional Climate Models (RCMs),透過降尺度的方式則得以獲得區域性高解析度資訊。

根據前人的經驗得以知道,RCMs 的模擬誤差有著隨計算時間增加而迅速增加情況,模擬時間超過一個禮拜後,其結果將失去真實性以至不足採信 (Lo et al., 2008)。為解決此問題,長期氣候模擬的方式亦有所謂的重複初始化 (Re-initialization) 的方式來進行

模擬,第一個區域氣候模式即是使用短期重複初始化做天氣預報 (Dickinson et al., 1989)。

另一方面, von Storch et al.(2000)將 Spectral Nudging 應用於氣候模擬,發現若是要針對過去的區域氣候統計,例如古氣候結構、歷史氣候的重現或氣候變遷的應用,為使天氣流場及大尺度作用場有一致性,則建議使用 Spectral Nudging。Lo et al.(2008) 研究指出, Nudging 能有效產生很好的區域氣候表現,而且在皆使用 Nudging 的情況下,短期積分和和長期積分的表現差異不大。此外,是否使用 Nudging 對於降尺度的影響比物理參數化的選擇影響來得大,且 RCMs 結果的好壞跟 GCMs 有極大的相關性。Miguez-Macho et al. (2004) 發現 Spectral Nudging 能夠有效減少網格位置及大小的選擇對於 RCMs 結果的影響。因

此本篇即欲探討在長期氣候模擬下，不同積分方式及 Nudging 資訊對於模式模擬的表現。

二、模式設定

本篇使用的模式為 WRF 3.3.1。網域中心點為台灣中心 (23.5°N、121°S)。本模擬採用兩層巢狀網格進行模擬，解析度為 15 公里及 5 公里，垂直解析度為 31 層，模式層頂氣壓為 50 hPa。第一層網域包含整個東亞及西北太平洋，第二層網域則以台灣附近為主。側邊界使用 5 個網格點的線性 Buffer Zone。初始資料和邊界資料使用解析度為 0.5°×0.5°的 CFSR，海溫每六小時更新一次。

在物理參數化部分，長波及短波輻射參數化皆使用 RRTMG scheme。微物理參數化使用 WSM5。積雲參數化使用 Modified Tiedtke scheme，僅使用在 15 公里的網域一。邊界層參數化使用韓國延世大學的 YSU scheme，地表參數化使用 Monin-Obukhov scheme，土壤參數化使用 Noah land surface model。WRF 模式原本使用的土地形態資料為美國地質調查局(簡稱 USGS)的資料，此資料為 1992 至 1993 間 AVHRR 遙測資料所得，然而其資料久遠，土地形態早已不同，因此根據 Cheng 等人(2013)，重新建構一組新的土地形態資料，針對台灣地區進行更新改善。

本研究欲探討冬季的長期氣候模擬表現，因此選 2009 年 11 月 16 日 0000 UTC 到 2010 年 3 月 1 日 0000 UTC，前半個月為 Spin-up 時間，實際分析從 12 月 01 日 0000 UTC 開始，共 90 天。重複初始化則進行三天半的模擬，前 12 小時為 Spin-up。

本篇使用 Spectral Nudging，權重為 0.0003，15 公里解析度模擬下所選用的 Nudging 波數為 5，5 公里解析度下的波數則為 2，即對尺度 1000 公里以上的資訊進行 Nudging。為保留邊界層內模式自行發展的能力，因此在高度的部分，不對邊界層內進行 Nudging。Nudging 的變數部分，除了傳統的風場、溫度及重力位外，亦有另增 Nudging 水氣進行實驗。

觀測資料使用解析度 0.75 度的 ERA interim、TRMM 衛星的降雨資料、全台自動雨量測站、台北及高雄人工測站。

敏感度測試於此分為兩部分。第一部份簡單分類如表 2.1，討論在 15 公里解析度下，不同積分方法及是否 Spectral Nudging 在長期模擬下的表現，為維持大尺度流場的水氣表現，。

表 2.1 第一部份實驗內容。

ID	積分方式	Spectral Nudging 變數
CTRL	長期積分	無
Reinit	短期 3 天積分 重複初始化	無
SN	長期積分	風場、溫度、重力位
SNQ	長期積分	風場、溫度、重力位、 混合

在獲得較合理的 15 公里網域一的資料後，即嘗試不同資料提供下對於高解析度模擬表現。因此第二部份討論更高解析度的 5 公里之下，不同側邊界資料及 Spectral Nudging 資料來源的差異，如表 2.2。所有實驗組初始場資料皆來自於 CFSR 再分析資料。第一個實驗組(SNQ_d02)和第二個實驗組(Reinit_d02)皆使用巢狀網格降尺度的方式，SNQ_d02 的側邊界資料來自於 SNQ 的網域一，Reinit_d02 的側邊界資料來自於 Reinit 的網域一，此兩者皆未 Nudging。第三個實驗組(ALL_ana)和第四個實驗組(SNQ_nd02)皆有 Spectral Nudging。ALL_ana 的側邊界資料及 Spectral Nudging 資料皆直接來自於再分析資料。SNQ_nd02 的側邊界資料及 Spectral Nudging 資料則皆來自於 SNQ，此實驗組主要使用的方式是巢狀網格的 Nesting Down (ndown)方式，此實驗組的目的是希望透過區域模式得到較高解析度的資訊之後，再接續且更多地提供給第二層網域，模擬出更詳細局地表現。

表 2.2 第二部份實驗內容。

ID	側邊界資料	Spectral Nudging 資料
SNQ_d02	SNQ	無
Reinit_d02	Reinit	無
ALL_ana	CFSR	CFSR
SNQ_nd02	SNQ	SNQ

三、結果與驗證

1. 長期模擬測試

圖 3.1.1 為 Reinit、SN 和 SNQ 與 CTRL 的比濕場相似度差值時序圖。SN 儘管有對溫度、風場及重力位進行 Spectral Nudging，但水氣在沒有 Nudging 的情況下，呈現與分析場資料最不相像的結果，平均相似度僅 0.930，甚至比相似度 0.946 的 CTRL 和 0.954 的 Reinit 還來得低。但若是透過對水氣的 Nudging 之後，相似度得到很好地提高，SNQ 達到 0.965。短期積分透過重複初始化的方式，其表現比起傳統長期積分來得好，然而在本篇的模式設定下，其相似度的部分則未比使用 Spectral Nudging 佳。

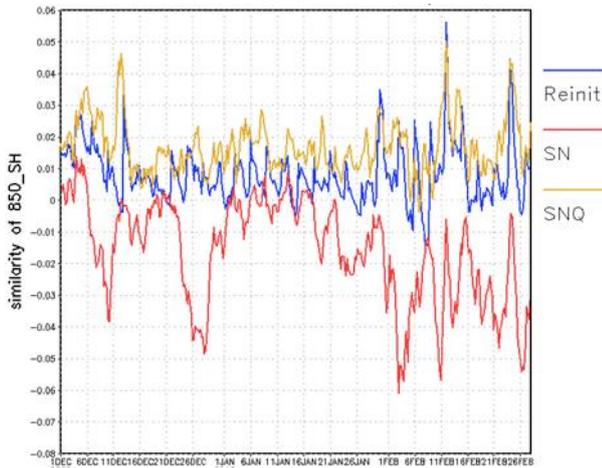


圖 3.1.1 Reinit、SN 和 SNQ 比濕相似度與 CTRL 差值時序圖。

此外，Reinit 不管是溫度或是比濕，皆維持著中等的表現，但 Reinit 卻可以從 3.1.1 時序圖上看到有三天週期的震盪。由於不斷重複初始化的緣故，模式模擬的表現相當不穩定，在模式模擬的第一天幾乎有著最佳表現，但隨著時間增加，尤其到了第 48 小時之後(不含 Spin-up 時間)，其表現迅速遞減變糟，然而到了第四天，即下一段的第一天時，相似度又重新提高。圖 3.1.2 為將所有 Reinit 的 72 小時模擬進行平均，可以很明顯地看到模擬結果在第三天之後迅速遞減，尤其在比濕場更加明顯，這樣不穩定的表現在長時間平均下也造成季平均模擬場與分析場的偏差，以本篇模式設定下，若是要得到一個相似度表現較穩定配合重複

初始化的短期積分模擬，則可以考慮增加重複初始化的頻率到每兩天一次。儘管如此，若是將 SNQ 的比濕及溫度相似度分別與 Reinit 的比濕及溫度相似度相減，即圖 3.1.3 的時序圖，圖上可以輕易看到無論是比濕還是溫度，幾乎都是大於零的表現，尤其是比濕更加明顯，而這樣的差距儘管有著三天的震盪週期，但結果亦幾乎大於零。這部份顯示了 Reinit 在 12 小時的 Spin-up 及本篇的網域設計下，儘管有重複初始化，但幾乎僅僅在第一天的第 6 或第 12 小時偶爾優於 SNQ。

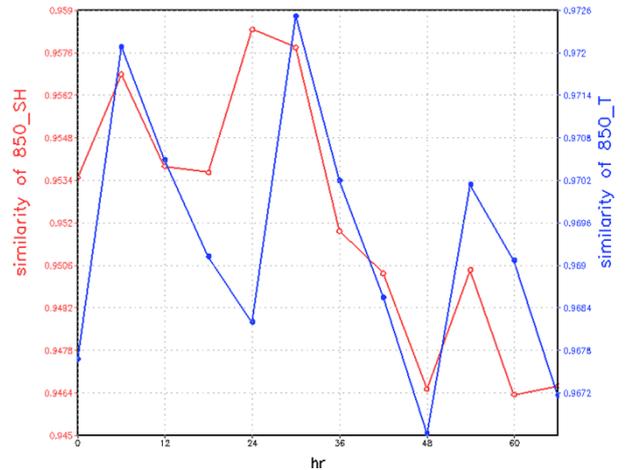


圖 3.1.2 Reinit 於 850hPa 季平均溫度與比濕的 72 小時平均相似度時序圖。

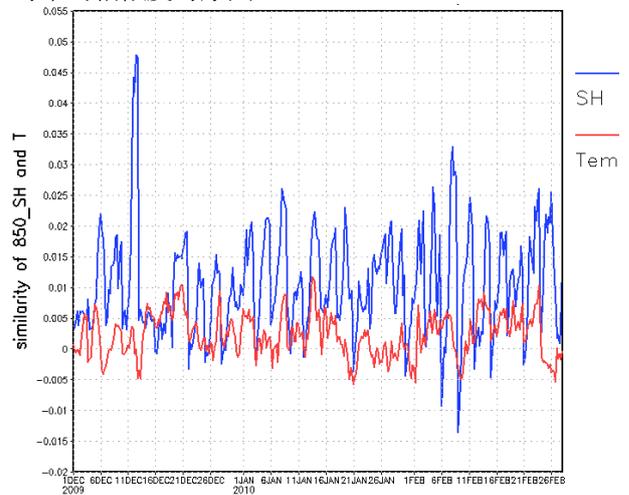


圖 3.1.3 Reinit 於 850hPa 季平均溫度與比濕的 72 小時平均相似度時序圖。

圖 3.1.4 為台灣地區附近的 TRMM 衛星觀測與模擬降雨表現，範圍為網域二的網域範圍，以此可以看到更詳細的雨帶分佈。CTRL 和 Reinit 在台灣北部的低估尤其明顯，CTRL 無論是小雨或大雨皆不正確，相關係數為 0.52。Reinit 在 3 mm 以下的降雨大致相

符，但 3 mm 以上則分布不實，相關係數為 0.57。SN 透過 Nudging 之後，對於華南地區及台灣北部的雨量稍有抓到分佈，有較好的改善。但由於水氣沒有 Nudging 的情況下，水氣分布不均，造成台灣東邊外海呈現 3 mm 以上的強降雨嚴重高估，相關係數僅 0.55。相較之下，SNQ 在有 Nudging 水氣的情況下得到很好的修正，既沒有 SN 的東部外海誤差問題，整體分佈也是與觀測較為接近，相關係數為 0.63 實屬四組實驗組最佳表現。

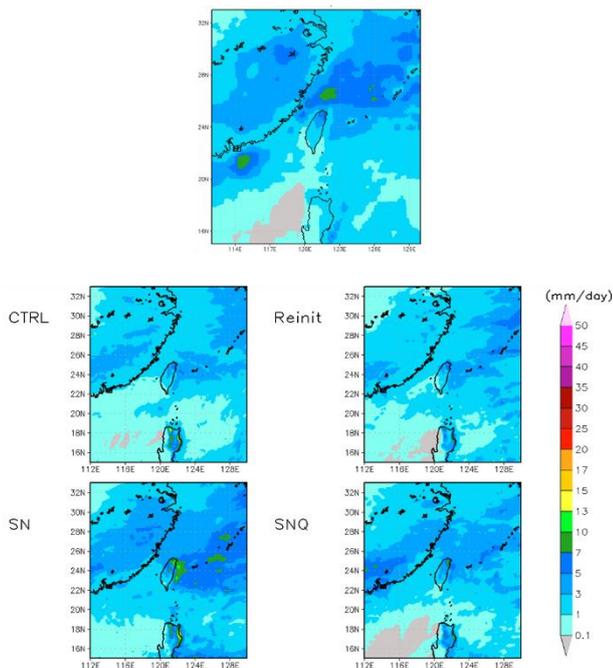


圖 3.1.4 TRMM 衛星觀測(上)及四組模擬場在台灣附近季平均降雨分布圖。

2. 側邊界及 Nudging 資料來源測試

圖 3.2.1 為 850 hPa 季平均比濕及風場分布，從分析場 ERA interim 可以看到，整個風場呈現反氣旋式旋轉，其中以北緯 26 度、東經 120 度東側的風向來看，應是西風接著西北風，由於網域選擇的位置及大小緣故，可以發現 SNQ_d02 右邊界有著明顯的風場誤差，模擬上是西北風接西風，在北緯 28 度的東側邊界位置形成一個輻合區域；網域右下方的分析場本是東北風，SNQ_d02 卻呈現東風，如此原因進而造成右邊界附近的水氣及溫度皆有所高估。Reinit_d02 亦有看到相似的情形，但由於有重複初始化的緣故，模擬表現好壞與初始場關係較大，邊界帶來的影響較小，誤

差相對來說則沒那麼大。除右邊界附近之外，Reinit_d02 整體誤差也較 SNQ_d02 小。SNQ_nd02 和 ALL_ana 由於有進行 Spectral Nudging，透過不斷的調整，因此原先 SNQ_d02 在右側邊界的風場問題有了很好的改善。然而由於 SNQ_nd02 的 Nudging 的資料來源 SNQ 網域一的比濕在模擬上已有高估情形，經過 Spectral Nudging 使模擬結果會貼近來源資料 SNQ 網域一，SNQ_nd02 因此亦較為高估。相較之下，ALL_ana 則呈現優於其他三者的最佳表現，除了菲律賓西側一帶稍有高估外，其餘分布幾乎相似。儘管如此仍可看到模擬結果的比濕仍是有所高估，原因主要是分析場的不同。從圖 3.2.1 可以看到分析場 CFSR 的比濕場本來就比 ERA interim 來得高，使用此資料進行模擬得到的比濕結果也理所當然地較 ERA interim 來得高。另一方面亦可看到，不管是 SNQ 的網域一或是 ALL_ana，透過 Nudging 分析場之後，其結果皆能與分析場 CFSR 相似，儘管與分析場 ERA interim 稍有所差異。

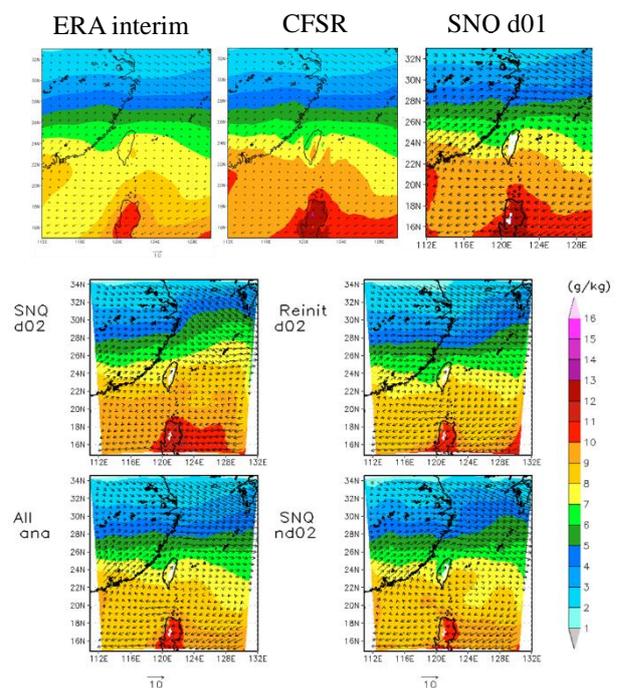


圖 3.2.1 分析場 ERA interim、CFSR (上)及五組模擬場於 850hPa 季平均比濕和風場分布圖。

圖 3.2.3 分別為台北及高雄的兩米溫度和地面氣壓日夜變化時序圖，用以代表台灣南北的各別表現。從圖中可以看到在沒有使用 Spectral Nudging 的情況下，SNQ_d02 在氣壓表現上皆是低估，而溫度的模擬

皆是偏高，雖然對於中午 11 點及下午 2 點的高溫模擬較為正確，但對於夜間的低溫則是高估許多。相較之下，在經過 Spectral Nudging 之後，無論是使用 CFSR 的 ALL_ana 或是使用 SNQ d01 的 SNQ_nd02 都有明顯改善，尤其是夜間表現，溫度和氣壓皆相當貼近測站觀測值，雖然對於日間溫度模擬皆偏低，但整體分佈及振幅皆與測站觀測相當符合。

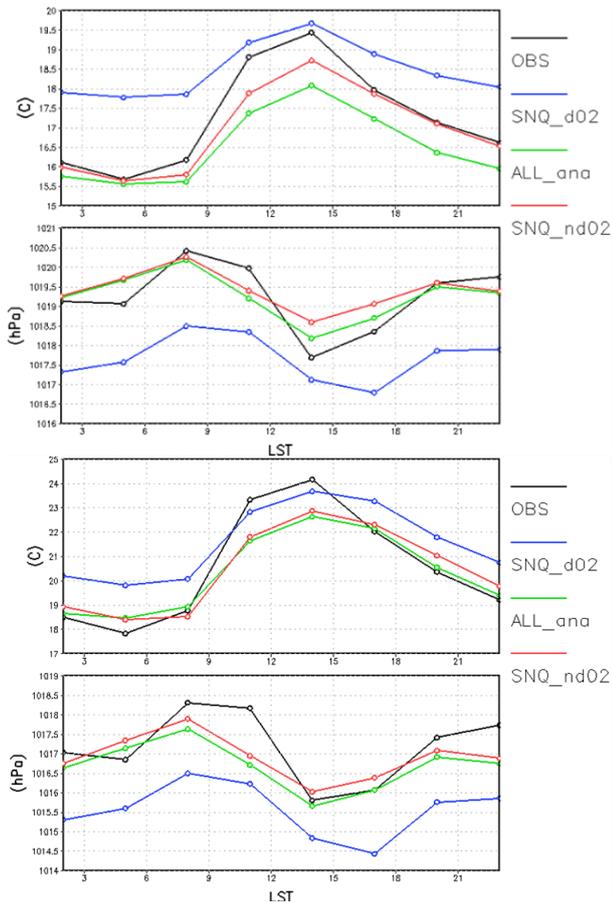


圖 3.2.3 SNQ_d02、ALL_ana 和 SNQ_nd02 在台北(上)及高雄(下)測站的季平均兩米溫度及地面氣壓的日夜變化時序圖。

圖 3.2.4 為降雨的 TRMM 衛星觀測與各種模擬。由於上述的網域問題，導致 SNQ_d02 圖上所見的右側邊界降雨的嚴重高估。Reinit_d02 雖有同樣高估，但較未如此嚴重。除此之外，Reinit_d02 對於降雨強值的分布亦未正確捕捉到，反而偏向在台灣東部的外海形成對流。ALL_ana 總體來說有著最佳也較為合理的表現。SNQ_nd02 透過 Spectral Nudging 改善模擬結果，但比起 ALL_ana 仍較差，台灣以東模擬出一條過強的雨帶，其主要原因是在高解析度的情況下，由於 Spectral Nudging 網域一的結果，而網域一的降雨分佈亦未極

完美，且其東部外海本來就有一條較強的雨帶，透過 Spectral Nudging 之後，導致 SNQ_nd02 在東部外海的降雨表現加強，若是更改不同波數，或許有機會改善該處的誤差。

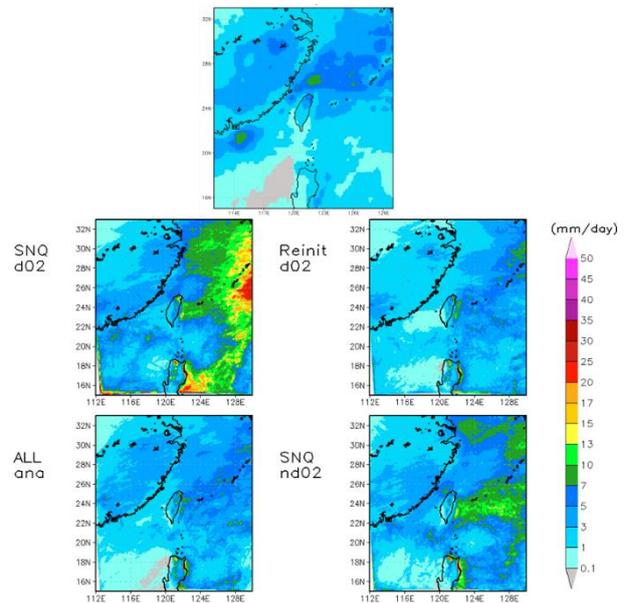


圖 3.2.4 TRMM 衛星觀測(上)及四組模擬場季平均降雨分布圖。

而以圖 3.2.5 的台灣陸上表現來說，氣象局自動雨量站觀測上是由北往南遞減，峰值在基隆及東北角位置。SNQ_d02，無論小雨或大雨皆呈現完全的高估，尤其北部更是過度高估到 20 mm 以上。Reinit_d02 及 ALL_ana 模擬結果相當接近，分布上也較為吻合觀測分布，但在南部地區的弱降雨的部分，Reinit_d02 則有些過度低估。SNQ_nd02 在基隆地區的最強值模擬是四者中最佳，數值最接近觀測實質，但在宜蘭地區的降雨卻是低估，如此降雨分布的誤差則非模擬所樂見。ALL_ana 相關係數達 0.68，SNQ_d02、Reinit_d02 和 SNQ_nd02 分別為 0.64、0.65 和 0.66。綜合來說，ALL_ana 不管在分布或相關係數都有較優秀且合理。

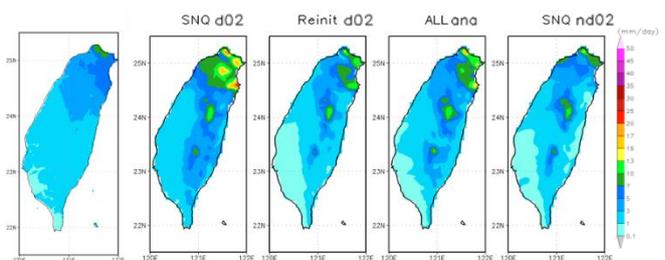


圖 3.2.5 CWB 觀測(左)及四組模擬場台灣季平均降雨分布圖。

四、結論

經第一部份測試，傳統的長期積分方法顯示了一個最糟的表現，不僅對於比濕有著最差的模擬，模式模擬出的降雨也有著較差的表現。相較於 Lo et al (2008) 所模擬的七天重複初始化，本篇使用時間更短的 3 天重複初始化，但可以發現在第三天之後的相似度有顯著的表現迅速變差情況，這樣的情形則有可能造成季平均場與分析場間更大的誤差，甚至影響降雨的表現。因此若是要使用重複初始化的方法並讓大尺度流場維持一定程度的相似度時，三天的重複初始化時間仍稍嫌太長，倘若要以更短時間重複初始化，則另須考量 Spin-up 及網域大小以找出重複初始化的最佳頻率。且本篇研究測試得到在 12 小時 Spin-up 及本篇網域設計的重複初始化模擬時，即便不考慮第三天的誤差，48 小時的表現仍不及長期積分配合 Spectral Nudging，若要提升其表現或許可以透過增大網域來改善，但同時也會增加計算時間及資源。整體來說，長期積分配合 Spectral Nudging 能有效地限制大尺度中的誤差的發展，但若是對降雨模擬進行探討，沒有調整水氣的傳統 Spectral Nudging 表現仍不貼近觀測場，會有高估情況，因此水氣有 Spectral Nudging 的必要。

在本篇第二部份的高解析度模擬下顯示，使用巢狀網格降尺度的方式即便擁有較高解析度的側邊界資料，但在長期的氣候模擬下若是沒有使用 Spectral Nudging，則仍會模擬出不合理的氣象資訊，大尺度流場亦會有與分析場的差異愈大的情形。此外，網域位置及大小對於區域模式模擬有極大影響，會造成與分析場相差極遠的嚴重誤差，若是透過 Spectral Nudging 的方式則能有效地減緩這誤差的發展。以本篇的模擬而言，側邊界資料及 Spectral Nudging 資料來源使用再分析資料的表現比使用網域一來得好。一方面的原因可能是因為冬季系統較少小尺度的特徵，多是綜觀尺度及大尺度的表現，因此直接使用 0.5°的分析場較接近綜觀尺度特徵，網域一的結果存在較多的區域特性；另一方面的原因則可能是網域一的模擬結果在分佈上本身既有的誤差，對於較穩定的冬季型態在網域

二則有加強誤差的隱憂，以本篇研究的案例及設定來說，網域一在沒有模擬準確前，不建議直接 Nudging 網域一，會有增大誤差的可能。然而透過本篇第三部份測試亦可得到，使用 GCMs 資料進行 Spectral Nudging 能夠有效地產生合理的大尺度流場，同時亦可比其他實驗組模擬出最為接近地面觀測資料的氣壓、溫度及降雨表現。

由研究內容中可以看到，使用 Nesting Down 的方式進行降尺度及 Spectral Nudging 雖未能模擬準確，但或許可以考慮對網域一進行包含邊界層的整層 Nudging 以減少網域一對分析場的誤差，得到較高解析度的網域一，在使用此方法來增進網域二的表現。在經過本篇的冬季研究之後，或許可以將同樣方法應用其他季節，或更多年的測試，藉以得到更多驗證。

五、參考文獻

- Cheng, Fang-Yi, Yu-Ching Hsu, Pay-Liam Lin, Tang-Huang Lin, 2013: Investigation of the Effects of Different Land Use and Land Cover Patterns on Mesoscale Meteorological Simulations in the Taiwan Area. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 52, 570–587.
- Dickinson, R. E., R. M. Errico, F. Giorgi, and G. T. Bates, 1989: A regional climate model for the western United States. *Clim. Change*, 15, 383–422.
- Lo, J. C.-F., Z.-L. Yang, and R. A. Pielke Sr., 2008: Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. *J. Geophys. Res.*, 113, D09112, doi:10.1029/2007JD009216.
- Miguez-Macho, G., G. L. Stenchikov, and A. Robock, 2004: Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate model simulations. *J. Geophys. Res.*, 109, D13104, doi:10.1029/2003JD004495.
- Von Storch, H., H. Langenberg, and F. Feser, 2000: A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. *Mon. Weather Rev.*, 128, 3664–3673.