

同化GPS RO資料對模擬西南氣流降水之影響

簡芳菁 邱彥超
地球科學系
國立臺灣師範大學

摘要

本研究利用WRF模式配合EAKF資料同化系統，針對2016年6月11至13日於臺灣中、南部平地與山區降下豪大雨的西南氣流個案進行GPS Radio Occultation (GPS RO)資料的資料同化實驗，藉以了解同化GPS RO資料對模式初始場與後續的臺灣地區降水預報有何影響。結果顯示，當同化過程加入GPS RO資料後，EAKF同化系統可有效的將觀測資料同化進模式中，並透過循環積分有效的修正初始場(first guess)，最終可獲得較佳的降水預報。預報結果顯示，加入GPS RO資料後，11日，上修中南部平地降水過少的預報結果，且降水更集中於中南部，與觀測接近。12日，下修中南部平地及山區過多的預報結果。在預報前36小時中，因水氣分布及對流發生位置較接近觀測，所以可獲得更接近觀測的降水預報結果。不論降水強度、降水發生地點以及降水發生時間，皆明顯改善。在預報36小時之後，同化過程是否加入GPS RO資料則對降水預報結果影響不大。西南氣流引發之豪大雨事件的預報中，水氣分布及西南氣流垂直結構之預報能力扮演一個重要的角色。

關鍵字：西南氣流、資料同化、系集預報、GPS RO

一、前言

臺灣位於亞洲大陸的西岸，太平洋東岸，深受海、陸不同類型的環境影響，造就臺灣獨特之氣候，例如梅年5-6月之梅雨季(陳 2004)。梅雨是由歐亞大陸中高緯度乾冷氣團和亞洲南方熱帶海域暖濕氣團，在華南及臺灣附近交會形成的結果，為東亞地區春末夏初的主要天氣現象。其主要特徵包括有一滯留鋒面，伴隨顯著水氣梯度，與鋒面南側強勁的西南風(Li et al. 1997; Lin et al. 1992)，在衛星雲圖上則常可觀測到一明顯濃密雲帶，由日本南方海面往西南延伸經臺灣至華南地區(Chen 2004)。西南氣流在梅雨季的豪大雨事件中扮演一個重要的角色。西南氣流會造成低層噴流(Low Level Jet, LLJ)，LLJ的垂直次環流可以在其上升運動的一端形成豪雨(Matsumoto 1972)，Chen (1977)則認為LLJ可在梅雨鋒面的南側造成潛在不穩定的大氣，並產生輻合而造成豪雨。西南氣流常輸送富含水氣與不穩定之氣流至臺灣西南海面，給中尺度對流系統(MCS)帶來一個絕佳的發展環境(Kuo and Chen 1990; Lau et al. 1988; Zhang et al. 2003)。MCS常為臺灣地區帶來豪雨，造成災害(Zhang et al. 2003; 陳2000)。有研究顯示，較強的低層西南氣流、較低的氣壓與較多的水氣傳送與輻合，可讓低層水氣輻合進入渦旋，透過第二類條件不穩定機制使MCS與梅雨鋒面增強(Chen et al. 2008)。臺灣地區西南氣流的研究中可見(簡與邱 2017)，梅雨季之西南氣流事件生成時，有

時會伴隨形成一條從孟加拉灣向東北東一路延伸至臺灣之水氣通道，將匯集於上游(孟加拉灣)之豐沛水氣往下游(西北太平洋)輸送，形成與東太平洋大氣河相同，穩定、大量且快速傳送水氣之狹長輸送帶之結構(Newell and Zhu 1994; Ralph et al. 2011; Smith et al. 2010; Zhu and Newell 1998)。豐富的水氣沿著西南氣流被傳送至台灣海峽南側，提供對流發展的有利條件，有利臺灣地區豪大雨事件之生成。

雖然我們對梅雨季的豪大雨事件中，西南氣流扮演的角色以及強降水發生過程已經有一定程度的認識，但在預報作業的實務上卻是困難重重。因臺灣四周環海，雖西方中國大陸地區以及臺灣陸地上有密集的傳統探空，但是包括臺灣東面之太平洋、北面之東中國海、南面之巴士海峽以及西南方南中國海洋面上之觀測資料，即使有船舶與飛機的輔助觀測，相較於陸地上的觀測資料，仍然相當稀少。若天氣系統發生在海上，因觀測資料較陸地少，造成預報往往會出現較大的誤差(簡等2008)。相對於傳統的探空觀測，遙測是目前用來取得海上的觀測資料的方式之一，當中最常被使用最廣泛的即是衛星遙測資料。過去已有研究將GPS掩星(GPS Radio Occultation, GPS RO)資料與傳統探空資料進行校驗，確認了GPS RO資料的精確程度(Chien et al. 2016; Kuo and Chen 1990; Ware et al. 1996)。且多個研究顯示，且經過資料同化系統，GPS RO資料有應用在改善全球模式、颱風、梅雨鋒面…預報的潛力(Cardinali

and Healy 2014; Huang et al. 2005; Kuo et al. 2008; Phunthirawuthi et al. 2016)。

模式之預報能力與初始場之準確度有關，全球模式提供的初始場解析度不足，且在預報區也很難反應出真實大氣的狀態，故常使用三維變分(Barker et al. 2004)、四維變分(Zou et al. 1995)及系集卡爾曼濾波器(Evensen 1994)等資料同化方法來改善初始場。三維變分、四維變分等WRFDA資料同化系統使用的是固定一組背景場誤差進行調整，但由於大氣的系統多為高度非線性，即使是一個初始的微小誤差可能在之後的計算中被放大，最後將嚴重影響到預報的結果，因此，系集預報同化系統開始發展。過去研究顯示(Schlatter et al. 1999)系集預報，不僅可用來製作機率性天氣預報，還可以在資料同化上用來產生更加精確的初始條件。如系集調卡爾曼濾波器(Kalman Filter)等系集預報系統，會在同化新的觀測資料後利用短期的系集預報加上下一個時間的短時期預報所得成場做趨勢，重新算出背景場誤差，使得背景場誤差會隨時間變動，更接近真實大氣狀態。

本研究共分為四個章結：第一章為西南氣流、GPS RO資料以及系集預報系統之相關文獻回顧；第二章介紹本研究使用之資料來源、模式設定及實驗設計等；第三章針對GPS RO資料進行EAKF資料同化，並統計分析GPS RO資料對模式之臺灣地區降水預報的影響；第四章為總結。

二、資料來源與模式設定

2.1 資料來源

做為WRF模式之初始場與邊界條件，本研究選用近年來資料品質穩定且優異之歐洲中期天氣預報中心ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)提供的ERA-interim資料(Dee et al. 2011)。時間解析度為每6小時一筆之分析場，水平空間解析度為 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ，其中包含了重力位高度、相對濕度、比濕、溫度、水平風場以及數種表面資料等。資料同化所使用的資料方面，本研究EAKF同化過程所使用的資料有福三衛星計畫(FORMOSAT-3/COSMIC) (Anthes et al. 2008; Rocken et al. 2000; Schreiner et al. 2007)衛星資料(GPS RO)共280筆(圖1a)、由地面與船舶施放的探空資料(Sounding)共 1592 筆(圖1b)。降水資料使用中央氣象局之每小時地面自動雨量站，每小時一筆之資料。

2.2 模式設定與實驗設計

本研究之實驗使用WRF(Weather Research and Forecasting)數值模式3.8.1(Skamarock et al. 2008)，本

研究設定三層網格，第一層(Domain 1, d 01)解析度為 222×128 格點距離45公里；第二層(Domain 2, d 02)解析度為 184×196 格點距離15公里；第三層(Domain 3, d 03)解析度為 251×301 格點距離3公里，兩層相鄰網格間的資料可以透過雙向交互作用(two-way interactive)將細網格預報結果回饋至粗網格，垂直方向則為45層。所使用的模式邊界如圖2所示。因WRF模式微物理方法、積雲參數法與邊界層參數法的設定皆會影響到預報結果，經多組實驗後選定，物理方法為Goddard Microphysics Scheme(Tao et al. 1989)、積雲參數法為Tiedtke Scheme(Tiedtke 1989)、邊界層參數法為Yonsei University Scheme(Hong et al. 2006)，做為EAKF及WRF預報過程之參數。以此組合在臺灣西南部出現強降水，有最佳的預報結果。

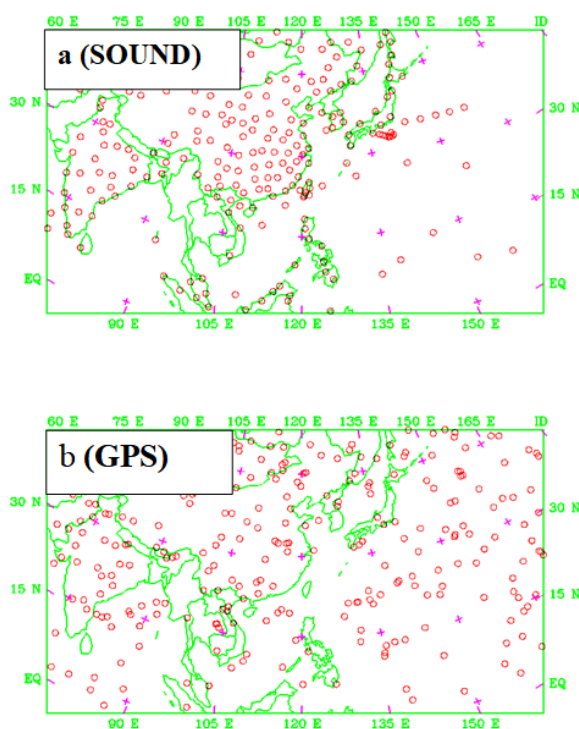


圖1 資料同化加入模式的(a)探空觀測、(b)GPS資料分布。

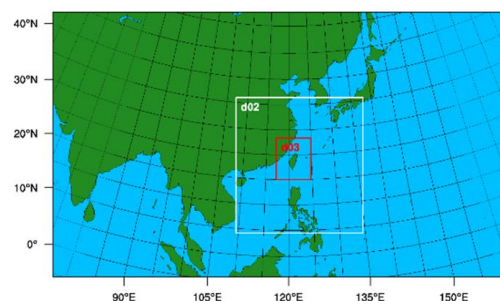


圖2 預報使用的domain。

系集調整卡爾曼濾波資料同化系統EAKF(Ensemble Adjustment Kalman Filter)為美國

家大氣研究中心(NCAR)的資料同化研究平台(DART)所研發的資料同化系統(Anderson 2001)，此系統擷取背景誤差，加入隨機亂數產製出數組不同的擾動初始條件(IC)，再利用這些初始條件更新全球網格邊界場得到新的擾動邊界條件(BC)，建立起數組不同系集成員。有了這些系集成員後，由EAKF將該時間的觀測資料經過上述的卡爾曼濾波系統處理後匯入做資料同化，得到系集分析場。將此分析場以WRF做六小時系集預報後，產出的結果將被作為下一個時間的初始場。經過數次循環後，可將所得數個不同時間的初始場用於48小時系集預報。此部份使用的WRF版本為WRF3.4.1。關於EAKF相關詳細內容可參考林等(2010)與NCAR DART網站(www.image.ucar.edu/DAReS/DART/)。

本研究挑選的個案為2016年6月11至13日於臺灣中、南部平地與山區降下豪大雨的西南氣流個案，期間降水的關鍵時間有三，分別為11日00至06時 UTC、12日02至09時 UTC以及12日18至00時 UTC。為求較佳的預報結果，本研究使用EAKF資料同化系統進行背景誤差，從2016年6月7日12:00 UTC開始進行前置作業，每6小時循環一次共循環14次，總共加入15個時間的觀測資料同化，各時間加入之觀測資料數如表1所示。於2016年6月11日00:00 UTC開始48小時的預報，並將此組預報稱為控制(CTRL)組。

表1 資料同化於各時間加入模式的探空觀測(1列)、GPS (2列)觀測資料數量

	0712	0718	0800	0806	0812	0818	0900	0906
SOUND	188	4	203	4	187	3	202	2
GPS	13	20	19	19	15	24	24	11
	0912	0918	1000	1006	1012	1018	1100	總
SOUND	187	3	208	5	187	4	205	1592
GPS	20	34	2	6	21	31	21	280

為了解同化GPS RO資料後對臺灣地區降水預報的影響，故設計一組實驗，在EAKF循環過程中僅同化Sounding資料，無加入GPS RO資料，將此組預報稱為nGPS組。比較nGPS與CTRL組之差異，了解在加入GPS RO資料後對預報產生的影響。此部分結果在第三章中呈現。

三、GPS RO資料對預報的影響

3.1 觀測分析

2016年6月10-13日，臺灣西南部及南部山區發生豪大雨。10-11日西北太平洋副高中心位於臺灣東側(圖3)，臺灣附近重力位高度梯度呈現東南東-西北西，臺灣位於東南風及西南風的交會處。由探空資料可見，11日00 UTC南海上(東沙島)風向為南南西風，風速為30節。12-13日西北太平洋副高南移，中

心位於臺灣東南側，臺灣附近重力位高度梯度轉變成東南-西北，西風分量增強，臺灣附近風場皆轉為西南風。由探空資料可見，12日00 UTC，南海上(東沙島)風向轉為西南風，風速增加至35節。

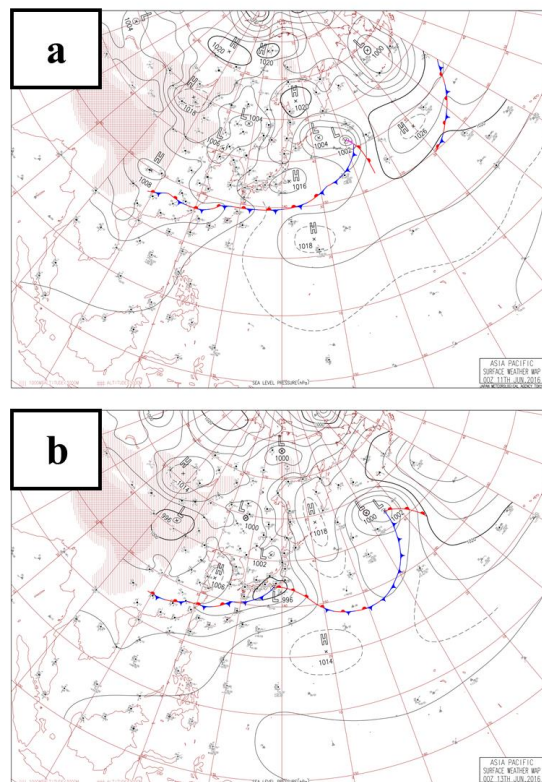


圖3 JMA提供的地面天氣圖。(a)2016年6月11日0000 UTC、(b) 2016年6月13日0000 UTC。

從局地的風場可見(圖未顯示)，10-11日，臺灣南部至巴士海峽一帶，處於地面風場東南風及西南風的交會處。低層為風場輻合且潮濕溫暖的環境，對流降雨在海面上發生後向北移至臺灣陸地，平地降水較多。中央氣象局觀測資料顯示，11日高雄至屏東平地有豪雨發生。12-13日，地面風場轉為西南風，水氣由臺灣西南部移入，因風場直交於南部山區地形走向，山區降水較強度較大。12日高雄山區有豪雨發生，13日高雄桃源區累積雨量達大豪雨等級。

3.2 降水預報結果

比較CTRL組及nGPS組(未同化GPS RO資料)全成員合成降水預報結果與自動雨量觀測降水分布，來判斷兩組預報之降水預報能力，以了解同過程加入GPS RO資料後對降水預報的影響。

觀測0~12小時(圖4a)，主要降水分布於臺灣中部山區、西南部平地與山區，最強降水發生於約22.5°N的屏東山區。CTRL組(圖4e)有掌握西南部平地與山區已集中部山區之降水，雖中部平地及東北角有兩個誤報的雨區，但最強降水仍發生於屏東山區，

整體預報結果理想。nGPS組(圖4i)西南部平地與山區之降水強度以及兩區範圍皆低估，東北部誤報兩區範圍比CTRL組更廣，最強降水亦誤報於宜蘭山區。CTRL組預報結果明顯較佳。

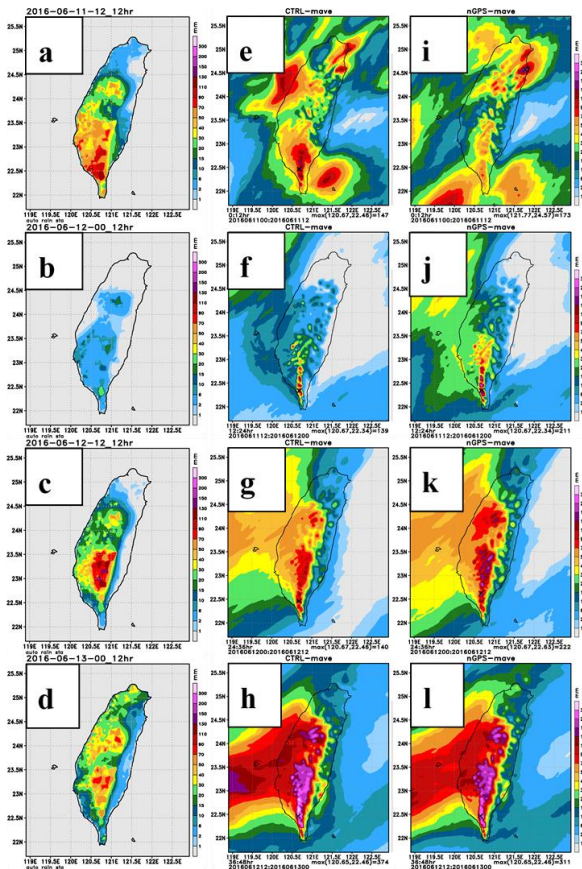


圖4 2016年6月(a)11日0000至11日1200UTC、(b)11日1200至12日0000UTC、(c)12日0000至12日1200UTC、(d)12日1200至13日0000UTC自動雨量站觀測累積雨量(單位: mm)。(e)-(h)同(a)-(d), 但為預報CTRL組之結果。(i)-(l)同(a)-(d), 但為預報nGPS組之結果。

觀測12~24小時(圖4b), 為兩波降水之間的降水空窗期, 降水仍分布於臺灣中部、西南部平地與山區, 但強度比前一時段減少甚多。CTRL組(圖4f)雖整體降水有高報的情況, 但兩區分布與觀測接近。nGPS組(圖4j)降水分佈與CTRL組相似, 但降水高報的情況更加明顯, 尤其在西南部山區至平地一帶。所以, 此時段預報結果仍是CTRL較理想。

觀測24~36小時(圖4c), 主要降水區域移至南、中部山區, 平地雨量較少。CTRL組(圖4g)雖整體降水有高報的情況, 但主要水區域兩觀測相同發生於南部、中部山區, 且有掌握到山區降水較多的特徵。與前一時段情況相似, nGPS組(圖4k)之降水分佈與CTRL組相似, 但南部至中部不論平地或山區, 雨量皆比CTRL組更加高報。此時段亦是CTRL預報結果較為理想。

觀測36~48小時(圖4d), 主要降水區域移由西南部逐漸轉移至西北部, 南部山區以及中部山區至平地一帶共兩個雨區。不論CTRL組(圖4h)或nGPS組(圖4l)之預報皆明顯高報, 且兩區分佈以及極值之位置與大小差異不大。

上述結果可知, 預報前36小時, CTRL組之兩區、降水強度預報能力優於nGPS組, 36小時之後兩組預報能力相當。

接著比較CTRL組與nGPS組臺灣西側平原至中央山脈區域之降水時序圖, 用以分析兩組預報之降水時間預報能力。觀測時序圖中可見(圖5a), 此段時間中有三波主要降水, 0~6小時(橘框)、26~33小時(紅框)、42~48小時(藍框)。第一、第二波之間約有20個小時降水稍緩之降水空窗期。

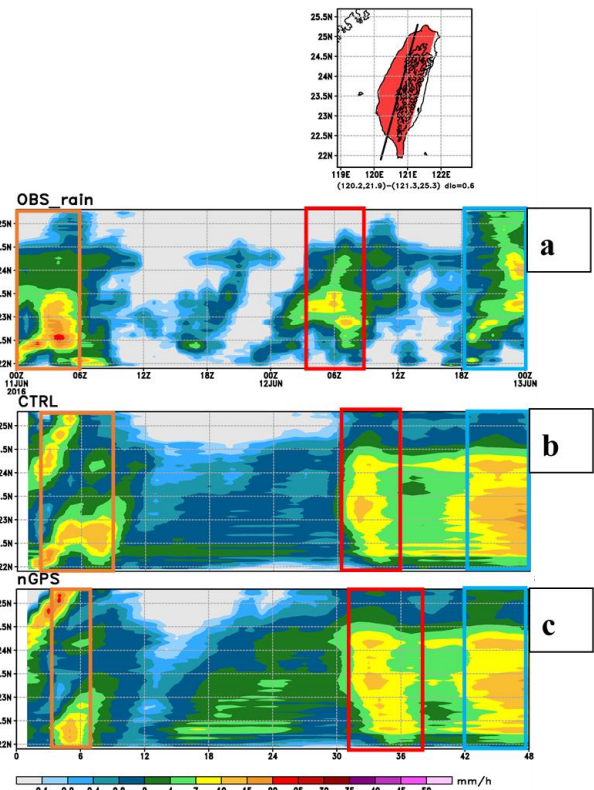


圖5 (a)自動雨量站觀測、(b)CTRL組及(c)nGPS組, 2016年6月11日0000UTC至13日0000UTC, 臺灣陸上(上圖紅色區域)經向平均降水強度時序圖(單位, mm/h)。橫軸為預報時間(hr)。

CTRL組(圖5b)與nGPS組(圖5c)都有掌握住三波降水以及降水空窗期之特徵。第一波降水(橘框), 兩組發生時間皆較晚於觀測, 但CTRL組持續時間較接近觀測, 持續時間約6至7小時; nGPS組則是過短, 僅約3小時。第一、第二波之間的降水空窗期, CTRL組約有20小時之空窗期, 與觀測接近; nGPS組則約有24小時, 且明顯可見在此段時間中降水強度較CTRL組高報。第二波降水(紅框), 雖然CTRL組與nGPS組發生時間都較觀測晚, 強度亦較觀測強, 但

降水極值發生時間，觀測約30小時前後；CTRL組約32小時；nGPS組約34小時，CTRL較接近觀測。第三波降水(藍框)，CTRL組持續時間與強度也比nGPS組接近觀測。最後一波降水，不論CTRL組與nGPS組發生時間兩組皆在42小時左右，都與觀測相近，但可見兩組高報的情況都很明顯，強度高報情況亦相當。兩組預報對最後一波降水之預報能力相當。

由此可知，模式之降水發生時間預報能力，預報前36小時，不論在主要降水時間或兩波降水之間的空窗期之發生時間掌握，CTRL組皆優於nGPS組。36小時之後兩組預報能力相當。

由比較兩組預報之降水分佈、降水時序後可知，當EAKF同化加入GPS-RO資料後，可提升預報前36小時，臺灣地區降水強度、降水分佈、降水發生時間之預報能力。36-48小時則無差異。

四、結論

本研究選取2016年6月11日至13日期間於臺灣中、南部平地與山區降下豪大雨的西南氣流個案，利用WRF模式及EAKF資料同化系統，在加入觀測資料後進行48小時預報，並對模式初始場的改變對臺灣地區降水預報所造成的影響進行探討。實驗過程使用EAKF資料同化系統，可以利用循環加入觀測資料並利用系集預報的技術取代決定性預報，能夠掌握模式預報的不確定性，增加預報時的信心度。電波掩星觀測資料(GPS RO)可彌補傳統觀測資料大部分集中陸地，洋面上的觀測資料並不多之缺點。

結果顯示，若在EAKF同化過程加入GPS RO資料，在預報的0-36小時，臺灣地區降水預報結果接近觀測，不論降水強度、降水發生地點以及降水發生時間，皆明顯改善。在預報的36小時之後，同化是否加入GPS RO資料則對降水預報結果影響不大。表示同化GPS RO資料對降水預報的效果可持續約36小時。由實驗結果可知，GPS RO資料的精確程度是可以信任的，並可應用在改善氣象預報方面。

參考文獻

- 林均瑱、劉暉、馮欽賜，2010: SoWMEX 實驗 EAKF 系集資料同化系統初步分析。交通部中央氣象局美華海洋大氣學會第五屆國際海洋大氣研討會，203-208。
- 陳泰然，2000: 台灣豪雨研究回顧與展望。科學發展月刊
- ，2004: 近期梅雨鋒面研究之回顧。大氣科學，32，225-245。
- 簡芳菁、邱彥超，2017: 臺灣地區之西南氣流與降雨。行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告。
- 、謝章眉、張文錦，2008: 投落送與 QuikSCAT 資料同化對 WRF 模擬之影響。大氣科學，36，217-247。

- 簡芳菁等，2006: WRF 模式之敏感度測試第二部份: 定量降水預報校驗。大氣科學，34，261-276。
- Anderson, J. L., 2001: An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2884-2903.
- Anthes, R. A., and Coauthors, 2008: The COSMIC/FORMOSAT-3 mission: Early results. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 313-334.
- Barker, D. M., W. Huang, Y.-R. Guo, A. Bourgeois, and Q. Xiao, 2004: A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: Implementation and initial results. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 897-914.
- Cardinali, C., and S. Healy, 2014: Impact of GPS radio occultation measurements in the ECMWF system using adjoint-based diagnostics. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 2315-2320.
- Chen, G., 2004: J. Research on the Phenomena of Meiyu during the Past Quarter Century: An Overview. East Asian Monsoon. Singapore: World Scientific.
- Chen, G T.-J., 1977: An analysis of moisture structure and rainfall for a Mei-Yu regime in Taiwan. *Proc. of Natl. Sci. Council.*, **1**, 1-21.
- Chen, G T.-J., C.-C. Wang, and S.-W. Chang, 2008: A diagnostic case study of mei-yu frontogenesis and development of wavelike frontal disturbances in the subtropical environment. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 41-61.
- Chien, F.-C., J.-S. Hong, and Y.-H. Kuo, 2016: Estimation of Marine Boundary Layer Heights over the Western North Pacific Using GPS Radio Occultation Profiles. *SOLA*, **12**, 302-306.
- Dee, D., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597.
- Evensen, G., 1994: Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **99**, 10143-10162.
- Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.
- Huang, C.-Y., Y.-H. Kuo, S.-H. Chen, and F. Vandenberghe, 2005: Improvements in typhoon forecasts with assimilated GPS occultation refractivity. *Wea. Forecasting*, **20**, 931-953.

- Kuo, Y.-H., and G T.-J. Chen, 1990: The Taiwan area mesoscale experiment (TAMEX): An overview. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **71**, 488-503.
- Kuo, Y.-H., H. Liu, Y.-R. Guo, C.-T. Terng, and Y.-T. Lin, 2008: Impact of FORMOSAT-3/COSMIC data on typhoon and Mei-yu prediction. *Recent Progress in Atmospheric Sciences: Applications to the Asia-Pacific Region*, World Scientific, 458-483.
- Lau, K., G Yang, and S. Shen, 1988: Seasonal and intraseasonal climatology of summer monsoon rainfall over East Asia. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 18-37.
- Li, J., Y.-L. Chen, and W.-C. Lee, 1997: Analysis of a heavy rainfall event during TAMEX. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 1060-1082.
- Lin, Y.-J., R. W. Pasken, and H.-W. Chang, 1992: The structure of a subtropical prefrontal convective rainband. Part I: Mesoscale kinematic structure determined from dual-Doppler measurements. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1816-1836.
- Matsumoto, S., 1972: Unbalanced Low-Level Jet and Solenoidal Circulation Associated with. *J. Meteor. Soc. Japan*, **50**, 194-203.
- Newell, R. E., and Y. Zhu, 1994: Tropospheric rivers: A one-year record and a possible application to ice core data. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 113-116.
- Phunthirawuthi, P., F. Wu, and P. Boonyuen, 2016: Performance analysis of GPS Radio Occultation assimilation for tropical cyclone monitoring. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016 IEEE International*, IEEE, 2181-2184.
- Ralph, F. M., P. J. Neiman, G. N. Kiladis, K. Weickmann, and D. W. Reynolds, 2011: A Multiscale Observational Case Study of a Pacific Atmospheric River Exhibiting Tropical–Extratropical Connections and a Mesoscale Frontal Wave. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 1169-1189.
- Rocken, C., K. Ying-Hwa, W. S. Schreiner, D. Hunt, S. Sokolovskiy, and C. McCormick, 2000: COSMIC system description. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, **11**, 21-52.
- Schlatter, T. W., and Coauthors, 1999: A five-year plan for research related to the assimilation of meteorological data. Accessible on the web at: http://www.mmm.ucar.edu/uswrp/reports/five_year_plan/title.html.
- Schreiner, W., C. Rocken, S. Sokolovskiy, S. Syndergaard, and D. Hunt, 2007: Estimates of the precision of GPS radio occultations from the COSMIC/FORMOSAT-3 mission. *Geophys. Res. Lett.*, **34**.
- Skamarock, W., and Coauthors, 2008: A description of the advanced research WRF Version 3, NCAR technical note, Mesoscale and Microscale Meteorology Division. *National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA*.
- Smith, B. L., S. E. Yuter, P. J. Neiman, and D. Kingsmill, 2010: Water vapor fluxes and orographic precipitation over northern California associated with a landfalling atmospheric river. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 74-100.
- Tao, W.-K., J. Simpson, and M. McCumber, 1989: An ice-water saturation adjustment. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 231-235.
- Tiedtke, M., 1989: A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1779-1800.
- Ware, R., and Coauthors, 1996: GPS sounding of the atmosphere from low Earth orbit: Preliminary results. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 19-40.
- Zhang, Q.-H., K.-H. Lau, Y.-H. Kuo, and S.-J. Chen, 2003: A numerical study of a mesoscale convective system over the Taiwan Strait. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1150-1170.
- Zhu, Y., and R. E. Newell, 1998: A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 725-735.
- Zou, X., Y. H. Kuo, and Y. Guo, 1995: Assimilation of atmospheric radio refractivity using a nonhydrostatic adjoint model. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2229-2250.