

西南氣流實驗 IOP-8 梅雨鋒面之降水粒子特性於觀測與 Double-Moment 雲微物理實驗之校驗分析

黃小玲¹ 楊明仁¹ 周俊宇²

1 台灣大學大氣科學系

2 中央氣象局

摘要

本研究使用 WRF 模式 3.2.0 版本模擬 2008 年西南氣流實驗(SoWMEX)期間 IOP-8 個案的梅雨鋒面降水事件，並透過實驗期間之高品質雷達及雨滴譜儀觀測資料的校驗，以探討降水事件之降水粒子特性與雨水粒徑及濃度的變化。因此，本研究藉由 Morrison (CTL)、Milbrandt and Yau (MY)、Thompson 及 WDM6 四組不同的雙矩量(double-moment)雲微物理參數化方法實驗，與高品質的 S-POL 雷達及地面雨滴譜儀觀測資料進行一系列的校驗及比較，以期為未來預報模式提供有助益的改善方向。由觀測與 CTL 實驗綜觀環境場、雷達回波及降水場的比較得知，CTL 實驗成功模擬 6 月 14 日至 15 日之 IOP-8 個案梅雨鋒面降水事件影響台灣期間的結構、強度、南台灣強降水分布及降雨率隨時間發展趨勢。本研究並進行 CTL 實驗及其它三組雙矩量雲微物理敏感度實驗，與 S-POL 雷達回波及地面雨滴譜儀觀測資料分析作校驗；模擬之 CTL 及 MY 兩組實驗於雷達回波降水粒子垂直分布與觀測較為接近，唯 MY 實驗模擬之梅雨鋒面強度偏強；Thompson 實驗產生過多的雪花粒子，使得高層層狀雲系分布較廣；而 WDM6 實驗之軟雹於 4 km 以上高度呈現過於高估的情形。另外，由地面雨滴譜儀於近地面雨水粒子大小及濃度觀測資料的校驗結果得知，觀測之雨水粒子及濃度分別較四組雙矩量雲微物理參數化實驗結果來得大及濃度偏低。由上述 Thompson 及 WDM6 實驗之冰相降水粒子濃度預報考量較不若其它兩組完整，因此於冰相轉換至水相的雲微物理過程即可能造成如上之雪花或軟雹之不合理高估情形；而雙矩量雲微物理參數化方法雨水粒子的原先設計為大陸降雨型態，與梅雨鋒面影響台灣期間挾帶之海上暖濕雨水型態不同，於是造成觀測及模擬實驗之雨水粒子粒徑大小及濃度的明顯差異。

另外，我們校驗觀測及 CTL 實驗之梅雨鋒面雲水、雲冰於海上至台灣迎風面及背風面之差異，以瞭解梅雨鋒面於不同地理環境之水相及冰相降水粒子特徵。分析結果顯示，雲水於海上至台灣迎風面受中央山脈地形舉昇有增加的勢趨，至台灣背風面則因下沉增溫機制使得雲水減弱；反之，雲冰於海上至台灣迎風面比例減少，移至背風面時則大幅增加。此研究結果更與 Huang et al. (2014)探討莫拉克(2009)颱風外圍對流雨帶於不同地理環境之水相凝結率(condensation ratio; CR)及冰相凝固率(deposition ratio; DR)表現雷同，以突顯出台灣地形對於梅雨鋒面及颱風強降水事件的影響及重要性。

一、前言

近幾十年來數值模式不斷地改進，氣象觀測的技術與品質也都大幅提升，進而提供數值模式更佳的初始條件，有助於改善模式在風場、溫度場、氣壓場與重力位高度場的預報誤差；但相對於降水場預報的改善依然十分緩慢，為數值模式中最難準確預報的參數之一；因此不論是觀測降水品質的提升，或是定量降水預報的改善皆是目前大氣學者們最重要的研究課題。有鑑於此，國內氣象界與美國 NCAR、日本及韓國的科學家共同合作，於 2008 年 5 月 15 日至 6 月 30 日期間在台灣本島及鄰近海域進行 Southwest Monsoon Experiment (SoWMEX)實

驗，又稱為 Terrain-influenced Monsoon Rainfall Experiment (TiMREX)；實驗期間透過高時空解析度的密集觀測，對於梅雨季西南氣流之熱力及動力過程，進行詳細的分析(Jou et al. 2011)，且再加上 S-pol (S-band Dual Polarization Radar)雷達及 TEAM-R (Taiwan Experimental Atmospheric Mobile-Radar)雷達，此兩部雙偏極化雷達合成所提供之梅雨鋒面觀測資料，有助於吾人校驗雲微物理參數化方案的適用性，以期為未來預報模式提供有助益的改善方向，以減緩因豪雨帶來的災害及民生損失。近期對於 IOP-8 個案的分析及研究成果已發表至各個大氣科學期刊(Tai et al. 2011,

Davis and Lee 2012, Xu et al. 2012, Hubbert et al. 2014, and Tu et al. 2014)。

近年來科學家們發展出新興理論(Cooper 1986; Verlinde et al. 1990; Walko et al. 1995)或進行雲微物理觀測實驗(Houze et al. 1979; Field et al. 2005; Ramanathan et al. 2001; Wang 2005; Khain et al. 2008)，於雲微物理參數化法增加降水粒子濃度預報，研發出雙矩量(double-moment)雲微物理參數化方案(Ziegler 1985; Murakami 1990; Ikawa and Saito 1991; Wang and Chang 1993; Ferrier 1994; Meyers et al. 1997; Reisner et al. 1998; Cohard and Pinty 2000; Seifert and Beheng 2001; Thompson et al. 2004; Morrison et al. 2005; Milbrandt and Yau 2005a, 2005b, 2006a, 2006b; Thompson et al. 2008; Lim and Hong 2010)，透過預報降水粒子粒徑譜隨時間變化之自由度特性，以改善雲微物理過程和輻射傳送的計算(Meyers et al. 1997)及 single-moment 雲微物理參數化法的不足。Brandes et al. (2006)並指出偏極化雷達處理之雨滴粒徑分布，與模式使用雙矩量雲微物理參數化的模擬結果較為相符。

本研究分析 SoWMEX 期間 IOP-8 之 2008 年 6 月 14 日至 6 月 15 日梅雨鋒面降水事件的密集觀測資料，並使用 WRF 模式模擬該事件以重現梅雨鋒面的結構及強度。再者，透過其它雙矩量雲微物理參數化方法進行敏感度測試，與 S-POL 之雷達降水粒子 PID (Particle identification)及廣興國小架設之雨滴譜儀的雨水粒子大小及濃度觀測資料，作進一步校驗，以瞭解現行預報模式使用之 double-moment 雲微物理參數化方法之特性及缺點；並參考 Huang et al. (2014)於 Morakot (2009)颱風外圍環流對流胞降水粒子之雲微物理現象於海上、台灣迎風面及背風面的研結果，探討觀測及 CTL 實驗之梅雨鋒面的液態水及固態冰於不同地理環境的差異；以期提供作業單位有助益的預報方向及改善方法。

二、研究方法及實驗設計

本研究採用 WRF (Weather Research and Forecasting; Skamarock et al. 2008) 模式 V3.2 版本 (Apr. 2010 Release)，模擬 2008 年 SoWMEX 實驗期間之 IOP-8 實驗於 6 月 14 日至 15 日的梅雨鋒面事件之結構、強度及南台灣強降水分布情形。實驗模擬的水平網域共 3 層，其網格大小分別為 9、3、及 1 公里 (如圖 1a 所示)，垂直層共有 31 層。模擬時間為 2008 年 6 月 13 日 0000 至 15 日 0000 UTC，共 48 小時。模擬實驗之邊界層及初始場資料取自歐洲中期天氣預報中心 (European Center for Medium-Range Weather Forecast; ECMWF) 之 $1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$ 全球分析資料。模擬之控制組(CTL)實驗使用 Morrison Double-Moment 雲微物理參數化方法(Morrison et al. 2005)，本研究未使用積雲參數化方法；邊界層參數化方法採用 YSU scheme

(Hong and Pan 1996; Hong et al. 2006)、輻射過程之短波及長波輻射的處理，分別使用 Dudhia(1989)大氣輻射方法及 Mlawer et al. (1997)之 Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)方法。

三、模擬實驗結果與討論

由觀測及 Morrison (CTL)實驗之地面綜觀環境場分析比較得知，CTL 實驗模擬 6 月 14 日 1200 UTC 之低壓系統 (120°E 及 30°N 處)、1008 hPa 等氣壓線及副熱帶高壓位置分布皆與觀測之地面綜觀分析場相似 (如圖 2a 及圖 3a)。另於 850 hPa 之觀測及 CTL 實驗綜觀環境場比較，顯示 CTL 實驗模擬的低壓及太平洋副高位置，與台灣外海區域之濕度場、西南風分量及冷暖區分布，皆與觀測分析場相符 (如圖 2b 及圖 3b)。比較雷達回波於 6 月 14 日下半日影響台灣地區之梅雨鋒面對流雲系的結構及發展得知，雷達回波之觀測(1300 UTC)與 CTL 實驗(1230 UTC)之梅雨鋒面對流雲系移入台灣地區受中央山脈之地形舉昇作用的加乘，有助於對流雲系結構增強，造成南台灣之台南、高屏及南部山區強降水的發生，唯 CTL 實驗模擬南台灣西部外海之梅雨鋒面雲系結構較觀測來得鬆散且強度偏弱 (圖 2d 及圖 4 之 CTL)。另外，觀測與 CTL 實驗之 6 月 14 日下半日於全台灣的 12 小時累積降水分布及南台灣區域之逐時降水平均 (計算區域為圖 1b 綠色框框之南台灣地區) 的比較結果顯示，CTL 實驗於南台灣 (台南 123 mm，高雄 156 mm) 之 12 小時累積降水分布與觀測 (台南 176 mm，高雄 176 mm) 類似，唯在強降水區呈現較為低估情形；且 CTL 實驗於南台灣區域平均之逐時降水趨勢亦與觀測相符，但降雨率有較為低估的狀況，而強降水發生時間集中在 6 月 14 日下半日 (圖 2c, e 及圖 5 之 CTL)。

本研究進一步透過 MY、Thompson、WDM6 三組雲微物理敏感度及 CTL 實驗，與合成雷達、降水、S-POL 雷達之 PID 分析及地面雨滴譜儀之雨水粒子觀測資料作校驗比對。於合成雷達及降水校驗結果發現，CTL 實驗之梅雨鋒面結構及強度與觀測最為接近，唯強度較觀測來得偏弱；MY 實驗降水水平分布及降雨率時序雖與觀測接近，但於台灣西部外海之梅雨鋒面結構有過強的發展；而 Thompson 實驗則明顯偏弱，但層狀雲分布則為各組實驗最廣；WDM6 實驗模擬之梅雨鋒面結構及降水強度亦有偏弱的情形 (圖 2e 及圖 4-5)。

另比較 S-POL 雷達觀測與各實驗之降水粒子的 PID 垂直分布，結果顯示，CTL 實驗與觀測最為相符；而 CTL、MY 及 WDM6 實驗於軟雹的分布皆有模擬過強的趨勢，以 CTL 實驗較為接近，但 WDM6 實驗於 6 公里高度甚至超過 30%；雪之 PID 分布於 Thompson 實驗則產生過多雪粒子，造成 5 公里以上高度的雪粒子產生不合理的高估情形，亦為造成高層層狀雲發展過廣而梅雨鋒面

強度偏弱的模擬結果(如圖6所示)。由降水粒子PID特性比較結果得知,現行雲微物理方案的設計應考量適當的液態水或固態冰濃度於雲微物理轉換過程間之改變,以改善現行預報模式於降水的模擬能更符合現實大氣環境。

本研究亦透過廣興國小雨滴譜儀觀測資料校驗各實驗模擬之近地面雨水粒子大小及濃度的表現,校驗分析發現,觀測之雨水粒子大小及濃度分別較CTL及其它三組實驗來得偏大且濃度偏低,其成因為雙矩量雲微物理實驗降水粒子及濃度的考量為大陸型態,但影響台灣之梅雨鋒面或颱風等強降水天氣事件之雨水來源為海上較大且單位濃度較低的鹽粒子,因而造成此雨水粒子特性的差異。(見圖7)

另外,吾人亦希望瞭解梅雨鋒面之對流胞結構於海上至台灣迎風面,再平移至背風面的不同地理環境的結構及強度變化,於是計算S-POL觀測及CTL實驗之雲水(qcw)及雲冰(qci)的PID(選取範圍為圖1b之藍色框框區域)隨經度的變化。比較兩者之雲水及雲冰分布結果,發現,觀測及CTL實驗之雲水於接近台灣迎風面時,受地形舉昇的加乘約有3%的增加,且CTL實驗增加的趨勢與地勢分布相符,反之雲冰則有減少的情形;當梅雨鋒面平移至背風面下沉氣流增溫環境下,觀測及CTL實驗之雲水則約有4%的減少,而雲冰的迅速增加則可高達約30%左右(如圖8所示)。此研究結果呼應Huang et al. (2014)探討莫拉克(2009)颱風外圍對流雨帶於不同地理環境之水相凝結率(condensation ratio; CR)及冰相凝固率(deposition ratio; DR)的差異,並突顯出台灣地形對於梅雨鋒面及颱風強降水事件的影響及重要性。

參考文獻

- Brandes, E. A., G. Zhang, and J. Sun, 2006: On the influence of assumed drop size distribution form on radar retrieved thunderstorm microphysics. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **45**, 259-268, doi:10.1175/JAM2335.1.
- Cohard, J.-M., and J.-P. Pinty, 2000: A comprehensive two-moment warm microphysical bulk scheme. I: Description and tests. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 1815-1842.
- Cooper, W. A., 1986: Ice initiation in natural clouds. Precipitation Enhancement — *A Scientific Challenge. Meteor. Monogr.*, No. 43, Amer. Meteor. Soc., 29-32.
- Davis, C. A., and W.-C. Lee, 2012: Mesoscale analysis of heavy rainfall episodes from SoWMEX/TiMREX. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 521-537.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077-3107.
- Ferrier, B. S., 1994: A double-moment multiple-phase four-class bulk ice scheme. Part I: Description. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 249-280.
- Field, P. R., R. J. Hogan, P. R. A. Brown, A. J. Illingworth, T. W. Choulaton, and R. J. Cotton, 2005: Parameterization of ice-particle size distributions for mid-latitude stratiform cloud. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 1997-2017.
- Hong, S.-Y., and H.-L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2322-2339.
- , Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.
- Houze, R. A., P. V. Hobbs, P. H. Herzegh, and D. B. Parsons, 1979: Size distributions of precipitation particles in frontal clouds. *J. Atmos. Sci.*, **36**, 156-162.
- Huang, H.-L., M.-J. Yang, and C.-H. Sui, 2014: Water Budget and Precipitation Efficiency of Typhoon Morakot (2009). *J. Atmos. Sci.*, **71**, 112-129.
- Hubbert, J. C., S. M. Ellis, W.-Y. Chang, and Y.-C. Liou, 2014: X-band Polarimetric Observations of Cross-Coupling in the Ice Phase of Convective Storms in Taiwan. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, (inpress)
- Ikawa, M., and K. Saito, 1991: Description of a nonhydrostatic model developed at the forecast research department of the MRI. *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, No. 28.
- Jou, B. J.-D., W.-C. Lee, and R. H. Johnson, 2011: An overview of SoWMEX/ TiMREX and its operation. *The Global Monsoon System: Research and Forecast*, 2nd ed. C.-P. Chang, Ed., World Scientific, 303-318.
- Khain, A. P., N. BenMoshe, and A. Pokrovsky, 2008: Factors determining the impact of aerosols on surface precipitation from clouds: Attempt of classification. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 1721-1748.
- Lim K.-S. S., and S.-Y. Hong, 2010: Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate Models. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1587-1612.
- Meyers, M. P., R. L. Walko, J. Y. Harrington, and W. R. Cotton, 1997: New RAMS cloud microphysics parameterization. Part II: The two-moment scheme. *Atmos. Res.*, **45**, 3-39.
- Milbrandt, J. A. and M. K. Yau, 2005a: A Multimoment Bulk Microphysics Parameterization. Part I: Analysis of the Role of the Spectral Shape Parameter. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 3051-3064.
- Milbrandt, J. A. and M. K. Yau, 2005b: A Multimoment Bulk Microphysics Parameterization. Part II: A Proposed Three-Moment Closure and Scheme Description. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 3065-3081.
- Milbrandt, J. A. and M. K. Yau, 2006a: A Multimoment Bulk Microphysics Parameterization. Part III: Control Simulation of a Hailstorm. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 3114-3136.
- Milbrandt, J. A. and M. K. Yau, 2006b: A Multimoment Bulk Microphysics Parameterization. Part IV: Sensitivity Experiments. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 3137-3159.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102** (D14), 16663-16682.
- Morrison, H., J. A. Curry, and V. I. Khvorostyanov, 2005: A new doublemoment microphysics scheme for application in cloud and climate models. Part I: Description. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 1665-1677.
- Murakami, M., 1990: Numerical modeling of dynamical and microphysical evolution of an isolated convective cloud. *J. Meteor. Soc. Japan*, **68**, 107-128.
- Ramanathan, V., P. J. Crutzen, J. T. Kiehl, and D. Rosenfeld, 2001: Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, **294**, 2119-2124.
- Reisner, J., R. M. Rasmussen, and R. T. Bruintjes, 1998: Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **124**, 1071-1107.
- Seifert, A., and K. D. Beheng, 2001: A double-moment parameterization for simulating autoconversion, accretion and selfcollection. *Atmos. Res.*, **59**, 265-281.
- Skamarock, W. C., and Coauthors, 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-4751STR, 113 pp. [Available online at http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3_bw.pdf.]
- Tai, S.-L., Y.-C. Liou, J. Sun, S.-F. Chang, and M.-C. Kuo, 2011: Precipitation forecasting using Doppler radar data, a cloud model with adjoint, and the Weather Research and Forecasting model: Real case studies during SoWMEX in Taiwan. *Wea. Forecasting*, **26**, 975-992.
- Thompson, G., R. M. Rasmussen, and K. Manning, 2004: Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 519-542.
- , R. M. Rasmussen, and K. Manning, 2008: Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 5095-5115.

Tu, C.-C., Y.-L. Chen, C.-S. Chen, P.-L. Lin, and P.-H. Lin, 2014: A comparison of two heavy rainfall events during the Terrain-influenced Monsoon Rainfall Experiment (TiMREX) 2008. *Mon. Wea. Rev.*, (inpress)

Verlinde, J., P. J. Flatau, and W. R. Cotton, 1990: Analytical solutions to the collection growth equation: Comparison with approximate methods and application to the cloud microphysics parameterization schemes. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2871–2880.

Walko, R. L., W. R. Cotton, M. P. Meyers, and J. Y. Harrington, 1995: New RAMS cloud microphysics parameterization. Part I: The single-moment scheme. *Atmos. Res.*, **38**, 29–62.

Wang, C., and J. Chang, 1993: A three-dimensional numerical model of cloud dynamics, microphysics, and chemistry. Part I: Concepts and formulation. *J. Geophys. Res.*, **98**, 14827–14844.

Wang, C., 2005: A modeling study of the response of tropical deep convection to the increase of cloud condensation nuclei concentration. Part I: Dynamics and microphysics. *J. Geophys. Res.*, **110**, D21211, doi:10.1029/2004JD005720.

Xu, W., E. J. Zipser, Y.-L. Chen, C. Liu, Y.-C. Liou, W.-C.H Lee, and B. J.-D. Jou, 2012: An orography-associated extreme rainfall event during TiMREX: Initiation, storm evolution, and maintenance. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 2555–2574.

Ziegler, C. L., 1985: Retrieval of thermal and microphysical variables in observed convective storms. Part I: Model development and preliminary testing. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1487–1509.

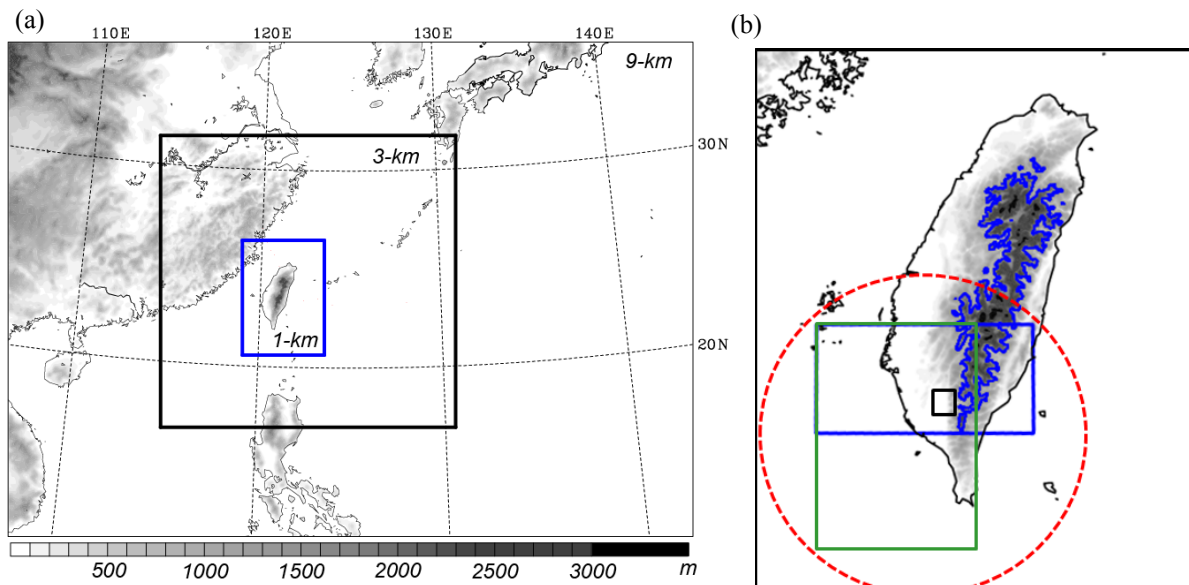


圖 1 (a) 模式網域設定及地形高度分布，與 (b) S-POL 雷達及雨滴譜儀觀測區域。其中，(b)之紅色虛線為 S-POL 觀測區域、藍色及綠色實線框框為 S-POL 與各組實驗之計算校驗區域，黑色框框為雨滴譜儀觀測資料區域。

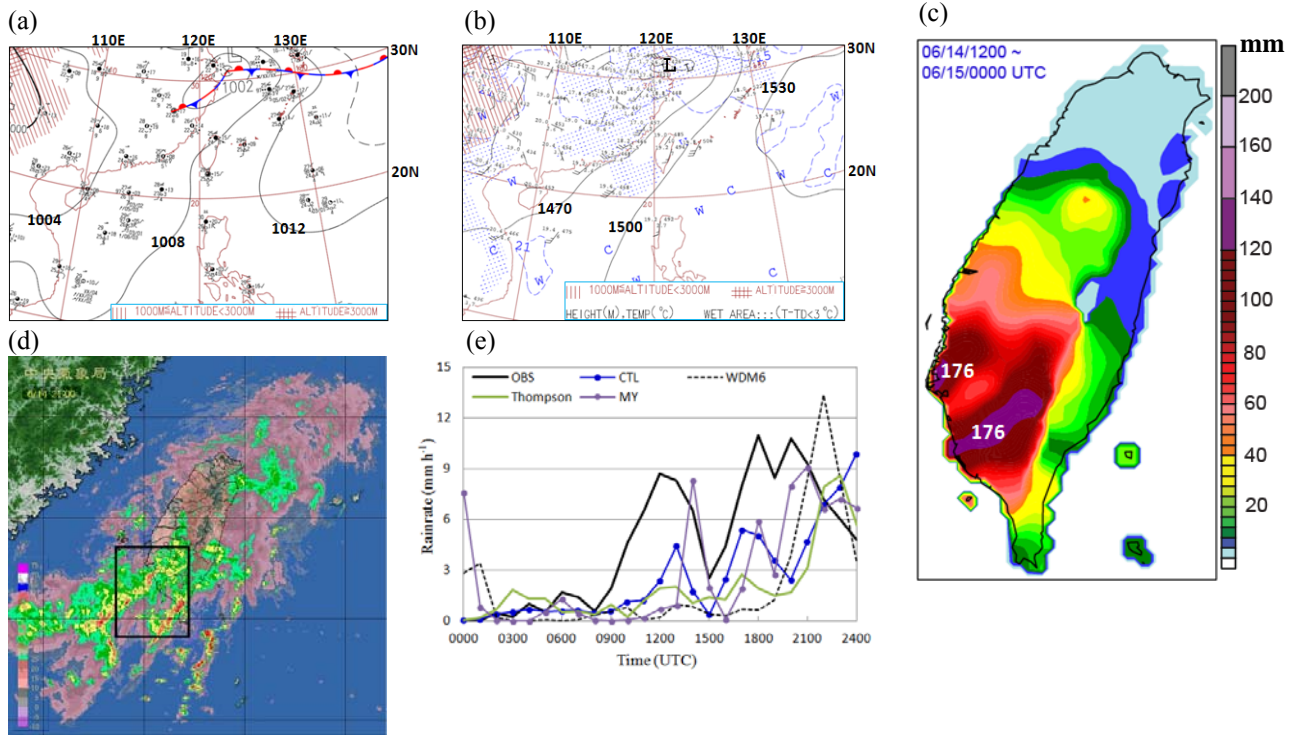


圖 2 觀測於 6 月 14 日(a) 1200 UTC 之地面綜觀氣壓及風場, (b) 1200 UTC 之 850 hPa 綜觀高度、風場及濕度場, (c) 12 小時累積降雨量, (d) 1300 UTC 之合成雷達, 與(e)1200 至 2400 UTC 於南台灣地區之逐時不均降雨率分布。其中, (d)之黑色框框為 S-POL 雷達觀測區域, 與圖 1b 之綠色框框相同; (e) 選取之計算區域為(d)之黑色框框的台灣範圍。

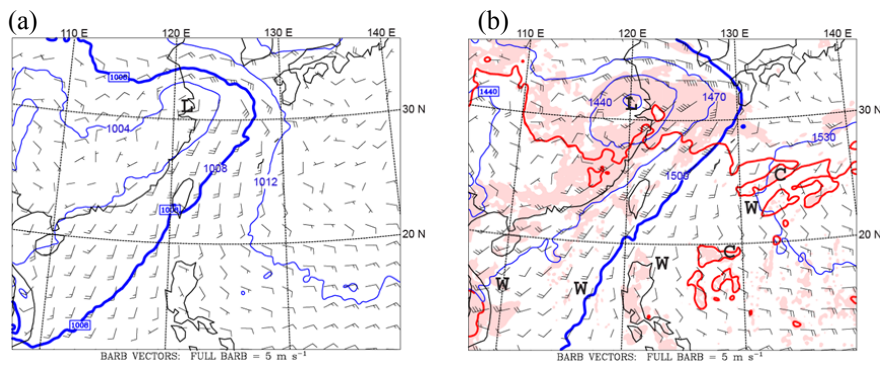


圖 3 CTL 實驗於 6 月 14 日 1200 UTC 之(a)地面綜觀氣壓及風場, 與(b) 850 hPa 綜觀高度、風場及濕度場分布。其中, (b)之色階為濕度場分布。

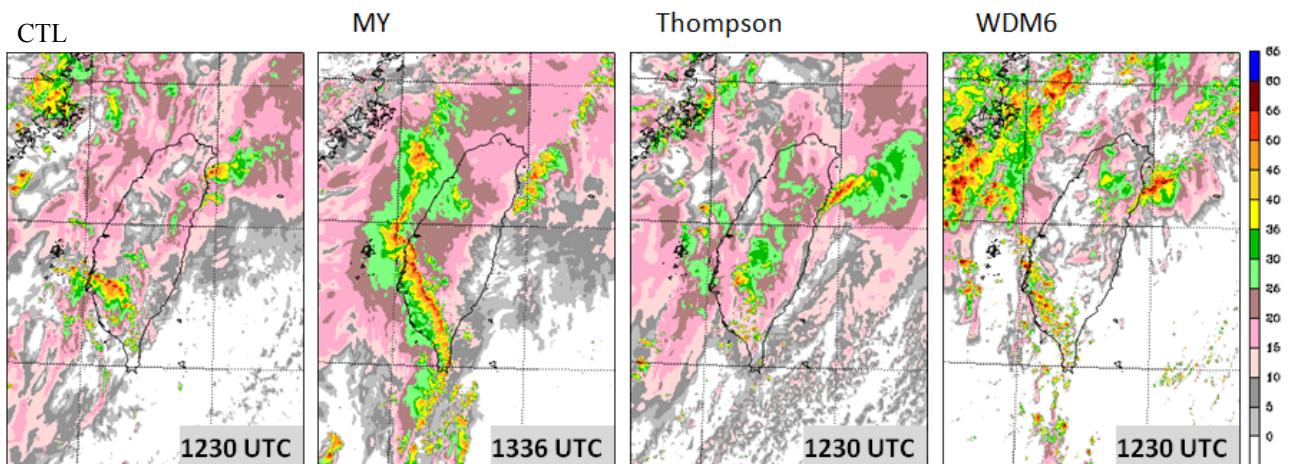


圖 4 CTL 與各組實驗於 6 月 14 日之雷達回波垂直最大值分布。

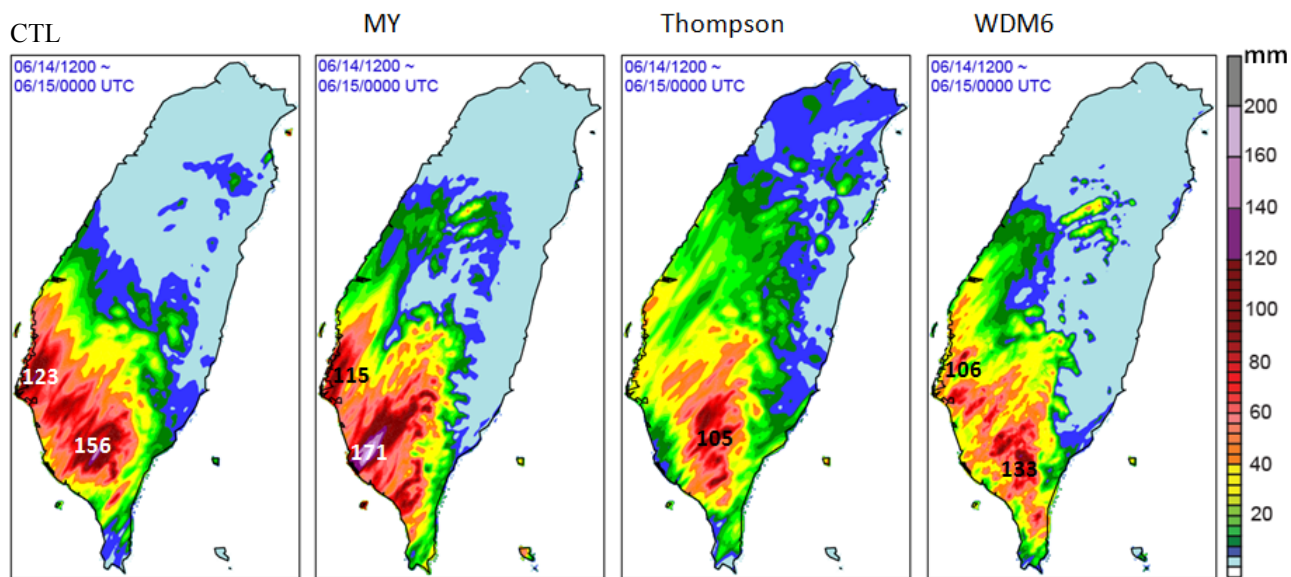


圖 5 CTL 與各組實驗於 6 月 14 日 1200 至 2400 UTC 之 12 小時累積降水分布場。

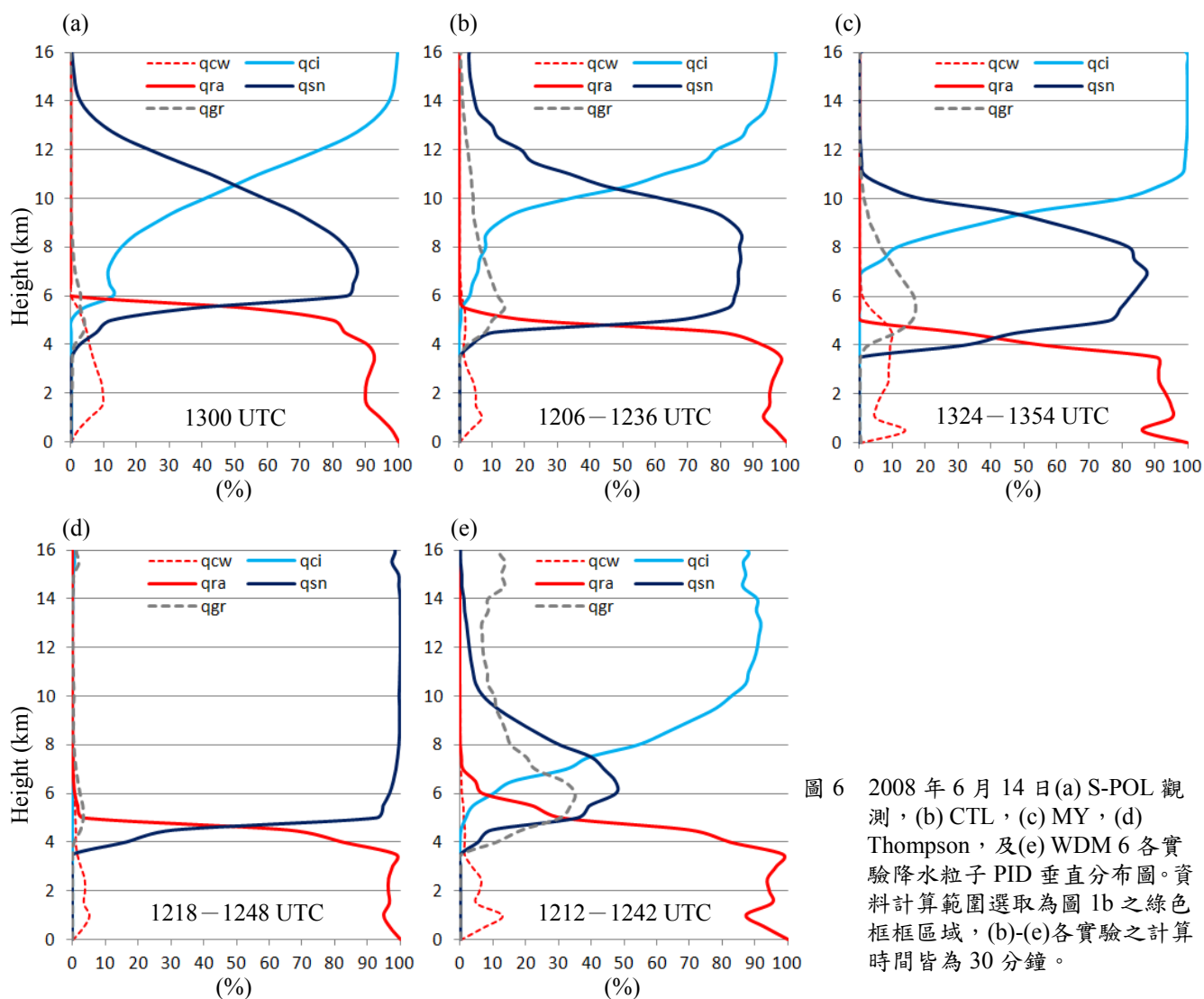


圖 6 2008 年 6 月 14 日 (a) S-POL 觀測，(b) CTL，(c) MY，(d) Thompson，及 (e) WDM 6 各實驗降水粒子 PID 垂直分布圖。資料計算範圍選取為圖 1b 之綠色框框區域，(b)-(e) 各實驗之計算時間皆為 30 分鐘。

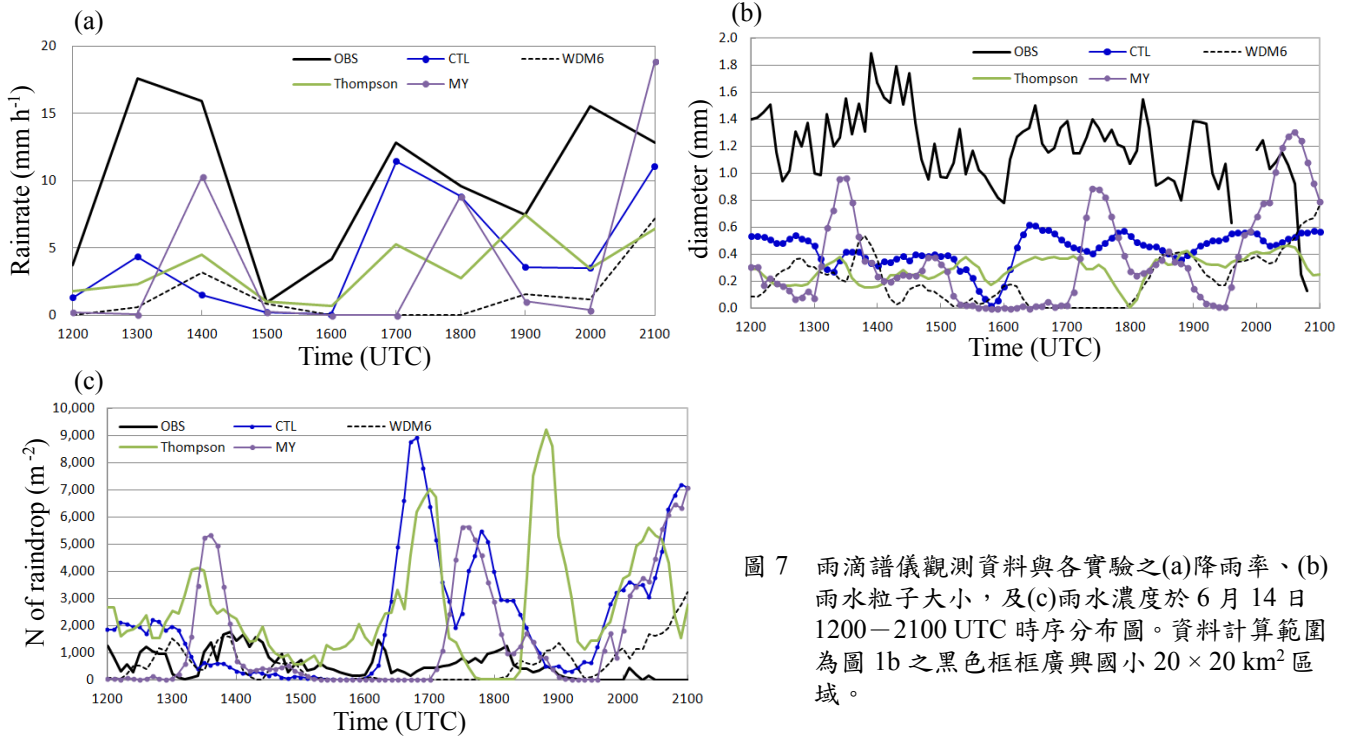


圖 7 雨滴譜儀觀測資料與各實驗之(a)降雨率、(b)雨水粒子大小，及(c)雨水濃度於 6 月 14 日 1200–2100 UTC 時序分布圖。資料計算範圍為圖 1b 之黑色框框廣興國小 $20 \times 20 \text{ km}^2$ 區域。

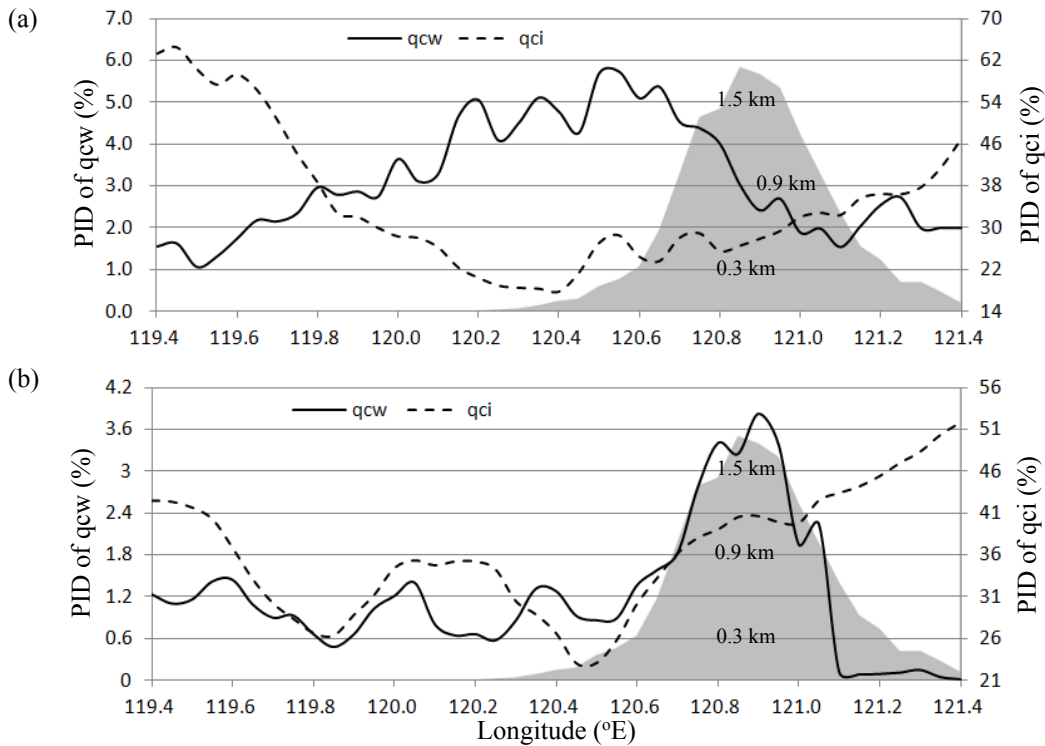


圖 8 (a) S-POL 雷達觀測資料於 1300 UTC，與(b) CTL 實驗於 1206–1236 UTC 於圖 1b 藍色框框區域的雲水(qcw)及雲冰(qci)粒子 PID 比較。資料計算為選取該區域每 0.05°E 於 22.5°N – 23.4°N 之緯向以及垂直方向 0 – 18 km 累積；灰階為台灣平均地形高度。