

梅雨鋒內海洋性中尺度對流渦旋之分析與模擬

賴曉薇 周仲島
國立臺灣大學大氣科學系

摘要

2008年6月伴隨梅雨鋒的中尺度對流系統在臺灣海峽上發展出一個中尺度渦旋。利用2008年西南氣流實驗期間加密探空及飛機海上投落探空儀觀測資料分析渦旋特徵，顯示此中尺度渦旋有明顯的氣旋式環流並伴隨中尺度低壓，具有不對稱的對流雨帶。本研究進一步利用WRF模式模擬該中尺度對流渦旋的發展並診斷其渦度演變過程。

依據渦旋發展，將中尺度對流渦旋生命期分為四個階段。第一階段『加強期』有顯著對流爆發，持續時間約5小時。經由輻合集中背景渦度，初始渦旋快速發展；並通過深對流濕化中高層大氣，羅士比變形半徑(LR)逐漸減小，對流所釋放的潛熱始得保存於系統中。『成熟期(約4小時)』時渦旋雨帶中同時具有上衝流和下衝流，對流活動持續加熱大氣，亦藉著對流拉伸作用形成局部渦度核。然而，自渦旋後側中層逸入乾空氣，LR增大，加熱效率逐漸減低。『再增強期(約5小時)』中層後側入流絕熱增溫更為顯著，中尺度低壓加深，然而中對流層渦度向外輻散，拉伸項呈現負貢獻。另一方面，渦旋南側的西南氣流沿低層冷區舉升形成側邊對流，藉由擾動渦度通量向內核區傳送渦度，抵消部分中層拉伸項影響，低層渦度得以持續增加。在『減弱期』乾空氣隨著後側中層環流加強持續進入渦旋，內核區的對流受到抑制，渦旋逐漸減弱。

關鍵字：西南氣流實驗、中尺度對流渦旋、不對稱對流、羅士比變形半徑

一、前言

臺灣地處副熱帶，春末夏初時，由歐亞大陸中高緯度來的乾冷氣團和從亞洲南方熱帶海域來的暖濕氣團在華南及臺灣附近區域相遇，產生了臺灣的梅雨。梅雨鋒雲帶內經常有組織良好並伴隨較大渦度的中尺度對流系統，常帶來劇烈降水，造成重大災害。在這些相關的中尺度現象中，中尺度對流渦旋與產生劇烈天氣之強烈對流系統密切相關。(本文中簡稱中尺度渦旋)

為加強對臺灣地區梅雨季天氣系統的多重尺度特徵及其與環境間的交互作用的了解，西南氣流與季風豪雨實驗(Southwest Monsoon Experiment / Terrain-influenced Monsoon Rainfall Experiment, SoWMEX/TiMREX; Jou et al. 2010)於2008年5-6月間在臺灣進行將近50天的氣象密集觀測與豪雨預報實驗，由台美雙方科學家共同提出並獲得周邊國家支持，增加南海和臺灣海峽大氣探空觀測(包括機載投落送)，分析研究南海西南氣流的熱動力性質。

在西南氣流實驗第六次密集觀測期間(2008年6月4日1800 UTC至6月5日1200 UTC)，於臺灣海峽首次以飛機投落探空觀測到海洋性中尺度渦旋案例。2008年6月4-5日，梅雨鋒由臺灣中部經臺灣海峽延伸至香港附近，存在一條長水平風切帶，中低層具有明顯氣旋式渦度和水氣梯度。6月4日1800 UTC，

衛星觀測到一中尺度對流系統迅速發展，逐漸形成逗點狀雲系，在中尺度對流系統的北側發現螺旋狀雲帶。隨著對流系統發展，降雨回波演變成不對稱型態，並顯示出渦旋前側潮濕、後側逐漸乾化的強烈對比。本文使用飛機投落送觀測針對伴隨該中尺度對流系統的氣旋式渦旋的渦度進行分析，發現在相隔6小時的兩次探空觀測之間渦度是增強的，而主要貢獻來自於拉伸項。

進一步以WRF(Weather Research and Forecasting Model)模式模擬個案的渦旋發展，並探討不對稱對流如何影響中尺度渦旋的演變。我們發現本個案渦度的發展受到局部對流型態和加熱效率的影響。中層因對流所導致之濕化過程、或後側低濕熵空氣逸入、則藉著改變羅士比變形半徑來影響內核區的加熱效率和暖心結構演變，進而影響渦旋的環流結構和強度維持。因此本研究將渦旋的內核區劃分為四個象限，探討不對稱對流和乾空氣的分布對系統發展的影響，並根據其對流特徵將系統生命期分為四個階段。

二、研究方法

本研究使用地面探空為經過校正之氣象局板橋、花蓮測站，空軍馬公、屏東及綠島測站，及實驗期間台中、六龜、恆春加密探空觀測(Ciesielski et al. 2010)。投落探空資料來自於第8次及第9次飛行任

務。第8次飛行任務釋放14顆投落探空儀，釋放期間為6月4日2145–2347 UTC，第9次飛行任務釋放10顆探空儀，釋放期間為6月5日0516–0629 UTC。並以七股氣象雷達風場定位氣旋中心來計算移動速度，分別對兩次投落探空進行時空修正至6月5日0000 UTC及0600 UTC的位置。。

渦度診斷方程取自Davis and Galarnau (2009)，如下：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\bar{\eta} \tilde{\Delta} A - \oint \eta' \mathbf{V}' \cdot \hat{\mathbf{n}} dl + \oint \omega \left(\hat{\mathbf{k}} \times \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial p} \right) \cdot \hat{\mathbf{n}} dl + \oint (\hat{\mathbf{k}} \times \mathbf{F}) \cdot \hat{\mathbf{n}} dl$$

是以環流的型式計算一塊區域內相對渦度的改變。右手邊第一項為平均輻合所造成的拉伸效應，第二項為擾動通量，第三項為扭轉項；第四項摩擦混合項在本文中忽略不討論。

中尺度模式選用WRF模式3.1版。初始及邊界資料來自於美國國家環境預報中心（National Center for Environmental Prediction, NCEP）六小時一筆的最終分析場。模式設定如下：使用藍伯特地圖投影，模擬的範圍使用三層巢狀網格，第一層、第二層和第三層的水平解析度分別為27、9和3 km，模擬的初始時間分別為6月4日00 Z、06 Z和12 Z，隨後的分析討論均使用模式第三層網格之模擬結果和積分時間來說明。初始之中尺度渦旋大約在最細網格積分後3 h（即6月4日15 Z）開始形成並發展。

三、中尺度渦旋發展的渦度收支

探空分析區域平均之中尺度渦度場，最大的正渦度發生在700–800 hPa之間（圖1）。這6小時之間，正渦度增強、增厚，最大的增量發生在800 hPa和近地層，由500 hPa左右增厚至400 hPa（約7.5km）以上。

使用00 Z的探空分析計算渦度增加的各项貢獻顯示（圖2）：拉伸項為增加深層渦度的主要貢獻者，在400-1000 hPa之間幾乎都有正貢獻，這個結果與400 hPa以下輻合場的趨勢一致。渦度擾動通量的正趨勢發生在700-925 hPa之間，這個高度大約與低層噴流的高度一致；渦度擾動通量在600 hPa以下大約提供了1/5的正貢獻。扭轉項負貢獻的量值大致與渦度擾動通量相抵消。在對流區中，扭轉項在最大渦度高度以下主要為負貢獻，以上則變號。這三項渦度貢獻相加，若相同趨勢維持不變，與6小時後的渦度增強相符，但量值上則較大，且未能顯示出近地層渦度增強的來源。

由模式模擬之區域平均相對渦度隨時間的變化顯示（圖3）：在初期，綜觀環境所提供的背景渦度主要出現在850–600 hPa，與西南氣流低層噴流相關的風切帶高度一致。強渦度層由750 hPa隨時間向上、下增厚，而最大平均渦度的高度則是由

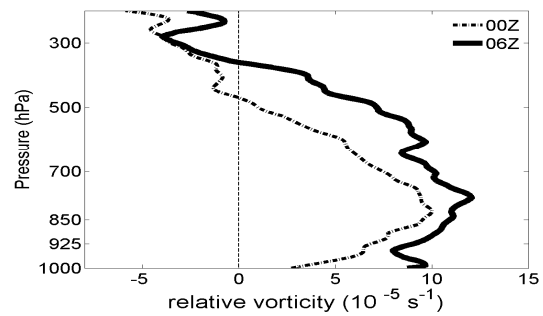


圖1：探空中尺度分析以渦旋為中心2.5° x 2.5°之區域內之平均相對渦度場垂直剖線。點虛線為6月5日00Z，實線為06Z。

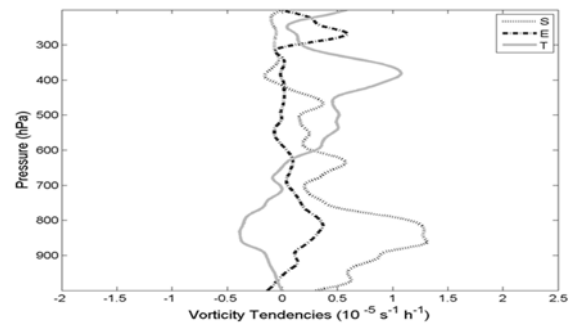


圖2：6月5日00Z探空中尺度分析各項渦度貢獻的垂直剖線。點線為拉伸項，點虛線為擾動通量項，實線為扭轉項。

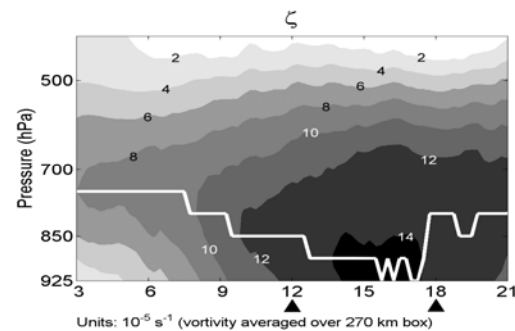


圖3：WRF模擬區域平均相對渦度之時間高度序列，橫軸為模擬時間，縱軸為氣壓，單位為 10^{-5} s^{-1} 。白色粗線表示最大相對渦度的高度。三角形標示圖1之兩次探空分析的對應時間。

750hPa往地面降低。中尺度渦旋發展到約14 h左右到達最大強度，約維持3小時。低層的強渦度隨後開始減弱，但仍維持在14 h之前相同的大小。

同樣的將各渦度貢獻項分別做高度-時間的分析（圖4）。拉伸項在中尺度渦旋發展增強期間為主宰項，在3-12 h間拉伸項在700 hPa以下為正貢獻，之後拉伸項在中對流層出現負貢獻。整體而言，渦度擾動通量項和扭轉項比拉伸項約小一個量級。在11-16 h之間，渦度擾動通量項在600 hPa至近地面之間有正貢獻，表示邊界上有環境渦度透過擾動傳送

至渦旋內部；約在16 h之後，渦旋靠近地形，擾動通量項在850 hPa以下有較明顯的負貢獻。渦旋發展前期（4-12h）扭轉項在最大過度高度以下為負貢獻；而在12h之後，最大過度高度降低至低層，系統整體變為反旋式風切，此時中層大範圍平均垂直運動轉為下沉，因此扭轉項在中低層為負貢獻。

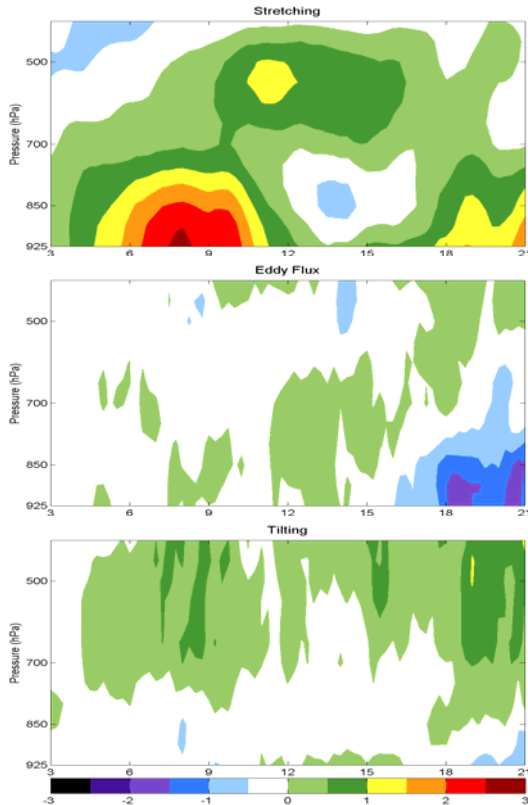


圖4：同圖3，但為過度收支方程各項區域平均，單位為 $10^{-5} \text{ s}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 。由上而下分別為拉伸項、擾動通量項及扭轉項。

四、渦旋內核區之象限平均分析

為探討系統之不對稱對流結構和加熱率與渦旋相對過度演變的關係，將中尺度渦旋之內核區劃分為四個象限（100 km x 100 km），以及渦旋內核前（東）側的區域（100 km x 200 km），分析各區域之對流活動、加熱效率以及相當位溫隨時間的變化（圖5-圖7），並依據對流發展特徵將中尺度渦旋發展的生命期分為四個階段。第一階段為『加強期』（3-8 h），隨後為『成熟期』（8-12 h），『再增強期』（12-17 h）和之後的『減弱期』。

在整個中尺度渦旋發展期間，西北象限上幾乎沒有對流活動，平均為下沉運動（圖5）。整體而言，從相當位溫高度平均隨時間的變化顯示整個生命期大氣普遍具有潛在不穩定度（圖7）。

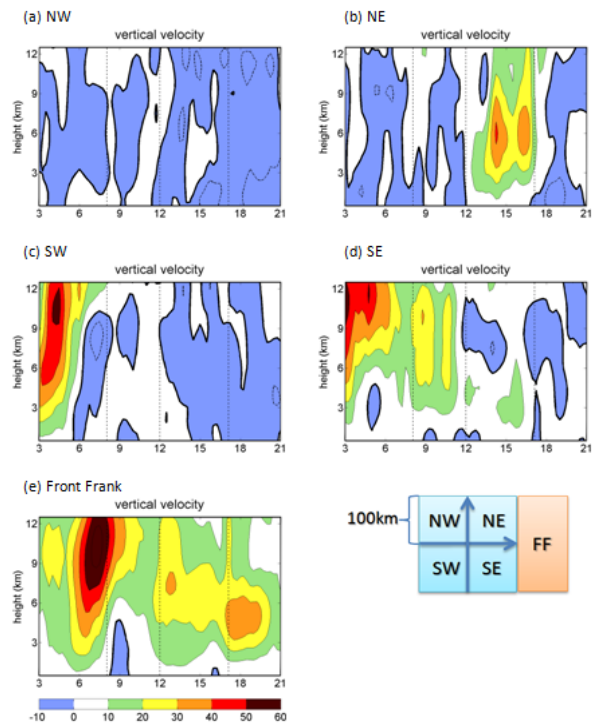


圖5：區域平均之垂直運動速度隨高度-時間變化（單位為 cm s^{-1} ），橫軸為模擬時間，縱軸為氣壓。以氣旋中心劃分內核區為四象限100 km x 100 km的區域，(a)為西北區域，(b)為東北區域，(c)為西南區域(d)為東南區域，以及(e)為氣旋內核區前側100 km x 200 km之區域。

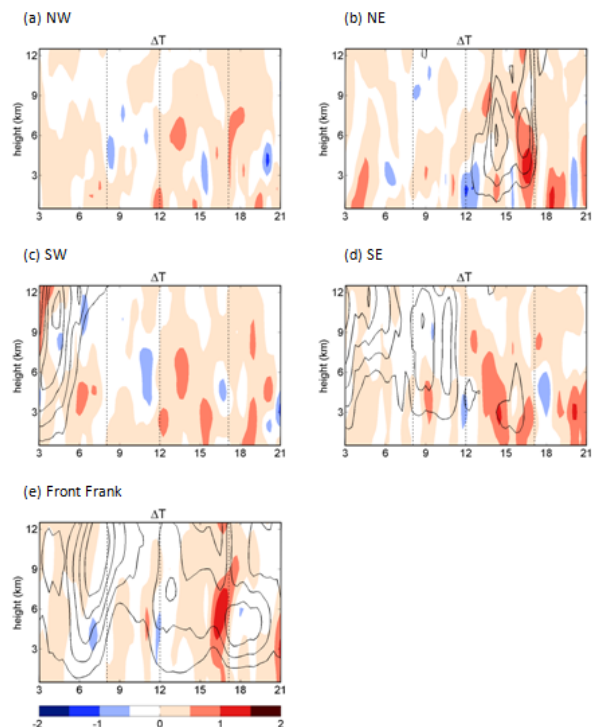


圖6：同圖5，但為區域平均增溫率（單位為 $^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ ）。黑實線為圖5之區域平均垂直運動速度大於 10 cm s^{-1} 部分（間格為 10 cm s^{-1} ）。

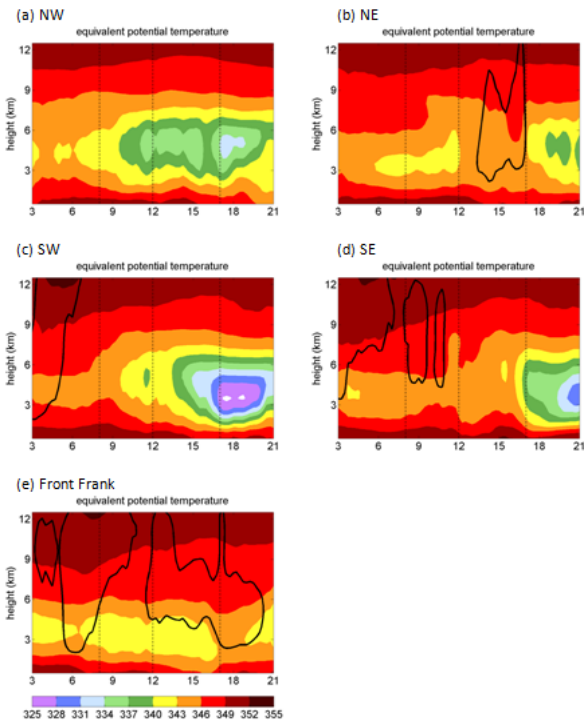


圖7：同圖5，但為區域平均相當位溫（單位為K）。黑實線圈出圖5之區域平均垂直運動速度大於 20 cm s^{-1} 部分。

『初生期』（ $< 8 \text{ h}$ ）深對流起始於南側的兩個象限，中尺度上衝流可達到 12 km ，最大的上升運動速度發生在 $10\text{-}11 \text{ km}$ ，深對流向東傳播到渦旋前側區域。初生的強對流區對應著深厚的潮濕邊界層（相當位溫大於 346 K 的厚度大於 3 km ），顯示深對流為潛在不穩定度釋放的結果。然而，從溫度變化的剖面來看， $3\text{-}6 \text{ h}$ 之初生深對流發展期間，南側區域的中高層大氣加熱並不顯著；反而是環流下游區域或深對流後期中低層有較明顯增溫。

『成熟期』（ $8\text{-}12 \text{ h}$ ）平均上升速度稍減，最大的上升運動仍發生在 9 km 以上，模擬顯示此時期同時具有中尺度上衝流和下衝流。對流區在 $3\text{-}5 \text{ km}$ 高度有較發展期明顯的增溫，中低層之高相當位溫亦增厚。而 6 km 以上中高層出現冷卻的現象，西側較東側明顯，可能原因為後側入流或下衝流使環境空氣逸入造成對流雲內的蒸發冷卻。在近地層出現微弱下沉，應與降雨造成的拖曳有關，也有些許的低層冷卻，西南側 3 km 以下亦呈現相當位溫隨時間降低。

『再增強期』（ $12\text{-}17 \text{ h}$ ）階段對流主要存在於東側象限及前側區域。平均最大垂直速度發生位置較低，大約在 6 km 左右，但其發展深度亦可至 12 km 。東側象限邊界層相當位溫顯著降低，呈現中性大氣特徵，暗示降雨後冷池的發展。東南象限的低邊界層空氣沿著冷池舉升至東北象限，此時期不像發展

期有較大的不穩定度，因此上升速度較弱。然而這段期間， 6 km 以下有較大的增溫率，持續時間也較長。

隨著中層乾空氣順著氣旋式環流由西北象限逐漸侵入南側及東側三個象限，南側象限更可見到中層相當位溫持續降低， 12 h 內溫差超過 20 K 。隨著中對流層乾化， 17 h 之後的『減弱期』渦旋內核區對流發展受到抑制，甚至大範圍平均垂直運動亦轉為下沉，只有渦旋前側區域的對流仍持續至 21 h 。

五、羅士比變形半徑

Chen and Frank (1993) 提到，受到長時間降雨影響，中層的濕化會降低濕浮力震盪頻率（Nm，Moist Brunt-Vaisala Frequency）而使得羅士比變形半徑（ L_R ）減小，有助於對流所釋放的潛熱保存在內核區中，加強中低層渦旋。根據 Durran and Klemp (1982) 之 (32) 式計算『初生期』的 4 km 高度的 Nm，在 4 h 內由 $9.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 降低至 $7.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，而 L_R 由 245 km 減小至 156 km （圖8）。歸納此時期渦旋之增強因素主要來自於對流爆發，雖然初期之加熱效率低，藉著一方面濕化中層大氣，降低 L_R ，對流所釋放的潛熱逐漸得以保存，氣壓持續降低，另一方面，當低壓逐漸形成時，大範圍輻合將中層環境的風切渦度集中，初始渦旋得藉由拉伸過程增強。

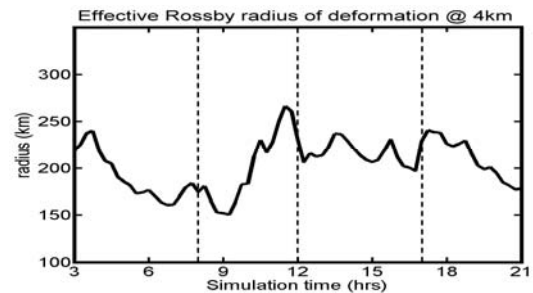


圖8：4 km 高度之羅士比變形半徑（單位為 km）。

至第二階段『成熟期』（ $8\text{-}12 \text{ h}$ ）時，雖然平均上升速度較弱，但由於 L_R 較小，增溫率較『加強期』為高，相對渦度加強、增厚。McFarquhar et al. (2012) 認為潛熱加熱主要來自於較弱垂直運動的貢獻，而不是來自於強對流；即對流雖然較弱，但若範圍大且持續時間長，其釋放的潛熱反而能更有效率地加熱大氣，而造成渦旋快速增強。然而，後側的中層有低濕熵空氣逸入而逐漸變乾，平均之 Nm 增加， 4 km 之 L_R 逐漸增加至 250 km ，加熱效率開始減低，中層的渦度增強速率減緩，最大渦度發展的高度降低。

在『再增強期』（12-17 h）間，中尺度渦旋之暖心結構增強至低層，其周圍及台灣西南部沿岸附近存在相對的冷區，西南風環流沿著冷空氣舉升而加強了東側及前側持續的對流；空氣沿著冷池舉升，主要輻合發生在近地層，相對於『加強期』，對流的最大垂直運動速度高度較低，平均的垂直速度亦較小，然而其持續時間超過5小時。受到長時間降雨影響，渦旋東側之中對流層再度濕化，呈現中性大氣特徵， L_R 較前期稍有減小，4 km的 L_R 平均為216 km，有助於前述之對流所釋放的潛熱保存在內核區。同時期中層後側乾入流持續侵入渦旋近中心，造成絕熱下沉增溫，當渦旋中層變暖，有利於其下氣旋式環流增強，在靜力平衡下，中尺度低壓加深，梯度風增加，加強了中低層之氣旋式環流，與熱帶氣旋中心氣壓下降的過程相似（Willoughby, 1990）。

由於此個案的綜觀環境具有相當大的水氣梯度，不僅使對流形成不對稱型態，甚至乾空氣順著環流遍及整個對流系統並侵入渦旋中心。17 h之後的『減弱期』，3-6 km高度持續被低濕熵的後側入流侵入渦旋內核區，濕絕熱遞減率增加，4 km的 L_R 變小，因暖心結構的加強使中層渦度有短暫的維持。但乾空氣隨著環流持續的入侵，抑制了近中心對流的發展，雨帶由內核區向外擴散。隨著潛熱加熱源徑向向外移出，渦旋便逐漸減弱（Braun et al., 2012）。

六、結論

本研究個案為2008年6月間梅雨鋒中尺度對流系統在臺灣海峽上發展的中尺度渦旋。本研究利用西南氣流實驗期間飛機投落探空儀觀測資料分析並驗證了WRF模式模擬中尺度渦旋渦度的發展及渦度變化。

此中尺度渦旋是一個沒有發展為成熟熱帶氣旋的個案。由觀測分析和模擬診斷發現，它的生命史中從初生、發展、減弱至再加強各階段受到複雜熱動力過程的相互影響，特別是伴隨局部強對流的渦度核，其上衝流的強度和位置在不同的背景渦度和穩定度的影響下所產生的加熱效率，以及一開始補償性下沉所造成的冷卻和逸入沉降增溫加強暖心，冷區提供的低層對流激發等，再再顯出加熱剖面在熱帶氣旋旋生過程中的重要角色。梅雨鋒面帶內中尺度對流渦旋有的會進一步發展成熱帶氣旋有的則沒有，進一步了解熱動力過程以及渦旋內更小尺度天氣現象所可能造成之影響，是接下來值得研究的方向。

【參考文獻】

- Braun, S. A., J. A. Sippel, D. S. Nolan, 2012: The impact of dry midlevel air on hurricane intensity in idealized simulations with no mean flow. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 236–257.
- Chen, S. S., and W. M. Frank, 1993: A numerical study of the genesis of extratropical convective mesovortices. Part I: Evolution and dynamics. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2401–2426.
- Ciesielski, P. E., W.-M. Chang, S.-C. Huang, R. H. Johnson, B. J.-D. Jou, W.-C. Lee, P.-H. Lin, C.-H. Liu and J. Wang, 2010: Quality controlled upper-air sounding dataset for TIMREX/SoWMEX: Development and corrections. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **27**, 1802–1821.
- Davis, C. A. and T. J. Galameau Jr., 2009: The vertical structure of mesoscale convective vortices. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 686–704.
- Duran, D.R., and J.B. Klemp, 1982: On the effects of moisture on the Brunt-Väisälä frequency. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 2152–2158.
- Jou, B. J.-D., W. C. Lee, and R. H. Johnson, 2010: An overview of SoWMEX/TIMREX. The Global Monsoon System: Research and Forecast. 2nd edition, C.P. Chang, Ed., World Scientific, 303–318.
- McFarquhar, G. M., Br. F. Jewett, M. S. Gilmore, S. W. Nesbitt, T.-L. Hsieh, 2012: Vertical velocity and microphysical distributions related to rapid intensification in a simulation of Hurricane Dennis (2005). *J. Atmos. Sci.*, **69**, 3515–3534.
- Willoughby, H. E., 1990: Temporal changes of the primary circulation in tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 242–264.

