

# 2019 年 7 月 1 日屏東龍捲風事件分析

李宗融<sup>1</sup>、廖信豪<sup>1</sup>、林忠義<sup>1</sup>、王安翔<sup>1</sup>、劉致灝<sup>2</sup>

氣象組<sup>1</sup> 資訊組<sup>2</sup>

國家災害防救科技中心

## 摘要

龍捲風是劇烈中尺度對流系統的一種，在臺灣龍捲風的生命期短、空間尺度小，過去並不容易被觀測與確認。但隨著隨身通訊與攝影設備的發達，越來越多龍捲風事件被民眾拍照、錄影並透過社群媒體廣為傳播。2019 年 7 月 1 日午後，屏東林邊地區發生龍捲風，第一時間透過社群媒體可清晰看到高速旋轉之漏斗狀雲及其快速移行之過程。本研究透過社群攀爬技術，收集民眾發布的龍捲風之影片及災害照片進行定位，初步研判本次龍捲風為東南向西北方向移動，與大環境風向一致。

高雄市林園雙偏極化雷達於 2017 年底啟用觀測，使得本次龍捲風成為臺灣首例由雙偏極化雷達觀測之陸地龍捲風，由於龍捲風距離該雷達僅約 12 公里，獲得許多高解析之雷達觀測結果。本研究針對激發龍捲風之對流系統進行分析，結果顯示，此龍捲風具有許多與美洲大陸由超級胞(supercell)激發之龍捲風相似的雙偏極化參數特徵，例如：勾狀回波、弱回波區(Weak Echo Region)、中尺度氣旋、龍捲風沙塵特徵(Tornado Debris Signature, TDS)，以及因為強烈上升氣流造成之弧形的差異反射率(Zdr Arc)、柱狀差異反射率(Zdr Column)、柱狀比差異相位差(K<sub>DP</sub> Column)以及柱狀結構隨高度傾斜等。而分析龍捲風發生時之環境條件，顯示當時對流可用位能為 493 J/Kg，在 500 hPa 高度以下存有風切且風向隨高度順轉，其移動朝向平均風切右方偏移。與過去研究比對，初步研判本次龍捲風為迷你超級胞(mini-supercell)所激發。

關鍵字：龍捲風、迷你超級胞、雙偏極化參數特徵

## 一.前言

龍捲風是由劇烈中尺度對流系統所激發的一種天氣現象(Markowski and Richardson 2010；張與劉 2016)，其旋轉、移動速度快，所經之處往往造成嚴重的風力破壞。而龍捲風可區分為由超級胞(Supercell Tornado)及非超級胞(Non-supercell Tornado)所激發。其中，美國中西大平原，由於位處不同性質氣團交會處，是超級胞的好發區，是全球發生龍捲風頻率最高的地區。除此之外，多數地區的龍捲風多屬非超級胞所激發(張與劉 2016)。

根據 Liu(2010)及張與劉(2016)統計過去 18 年(1998~2015)臺灣發生之龍捲事件(包含水龍捲與陸龍捲)共計 103 個，年平均約 5.7 個，其中又以水龍

捲佔多數(約 4 個)；龍捲發生的區域，以南部地區(臺南、高雄、屏東)頻率最高，約佔總數的 41.7%；發生的季節則以暖季(5-9 月)為主；午後 14~17 時為好發時段。這些龍捲風多是由鋒面、飆線、積雲等非超級胞之對流系統所激發。直至 2015 年臺南新化龍捲風，才是臺灣首例分析確認由迷你超級胞(Mini-Supercell)所激發之龍捲風。臺灣發生的龍捲風，空間尺度小(數十~數百公尺)、生命期短(數分鐘~數十分鐘)，在過去，往往難以被揭露或是查證。現今，隨著隨身通訊攝影設備普及及社群媒體發達，越來越多龍捲風事件(例如：2011 年 0512 新店龍捲風及 2015 年 0720 臺南新化龍捲風等)，都是透過即時攝影與社群發布，大幅提升事件確認與通報的時間。這點也可從 Liu(2010)及張與劉(2016)的龍

捲事件統計數量比較明顯看出。如前文所述，2015年臺南新化龍捲風，是臺灣首例由迷你超級胞所激發之龍捲風。所謂迷你超級胞就是具有類似超級胞的結構特徵，例如：勾狀回波(Hook echo)、弱回波區(Weak Echo Region)、中尺度氣旋、移動方向偏向平均風之右側等，唯獨在系統之水平、垂直尺度(<5公里)及比例(約 1:1)，均較超級胞來的小。迷你超級胞龍捲風的形成的有利大氣環境，包含近地面需存在輻合帶、低層可用位能約 200J/kg、低層風向隨高度順轉等(Suzuki et al. 2000；張與劉 2016)。

根據 Lemon and Doswell(1979)所提出之超級胞概念模式(圖 1)，主要包含一股上升氣流及兩股下沉氣流，分別為後側(RFD)及前側下沉氣流(FFD)，也因為這樣的運動結構，使得超級胞或是其激發的龍捲風在都卜勒雷達觀測上有許多的特殊特徵，例如：勾狀回波、弱回波區(WER)，徑向風場雙極化(dipole)特徵(Markowski and Richardson 2010)。隨者雷達硬體的演進，根據 Kumjian and Ryzkov(2008)分析美洲大陸 18 個超級胞個案的雙極化雷達觀測參數特徵，在其中 11 個有激發龍捲風的個案中，發現了龍捲風沙塵特徵(Tornado Debris Signature, TDS)，也就是在勾狀回波的尖端(圖 1 中 T 的位置)，有高回波(dBZ)、低差異反射率(Zdr)及低相關係數( $\rho_{hv}$ )的現象，弧形差異反射率特徵(Zdr Arc)、柱狀的差異反射率(Zdr Column)、柱狀的比差異相位差( $K_{DP}$  Column)及中層的環形差異反射率(Zdr Ring)、環形的相關係數( $\rho_{hv}$  Ring)等，這些特徵都與超級胞的上升、下沉氣流運動結構與水象粒子的微物理過程有關。

2019 年 7 月 1 日午後，屏東林邊地區發生龍捲風，第一時間透過社群媒體與即時新聞都可清晰看到高速旋轉的漏斗狀雲及其快速移行過程之照片或影片。如同前文所述，由於激發龍捲風之深對流系統或是龍捲風本身，其空間尺度小，移動速度快，氣象雷達高時間、空間解析度之觀測特性，就成了觀測、分析甚至是即時預警的利器。由中央氣象局與水利署共同規畫建置於高雄林園的 C 波段雙偏極化雷達(RCKS)，在 2017 年底正式上線執行觀測作業，也使得本次屏東林邊龍捲風生命期間

得以被完整觀測。李等(2019)已針對本次龍捲風災情資料彙整及事件綜觀環境、雙偏極化雷達觀測特徵進行定性描述，本研究將整理及引用李等(2019)的分析結果，加強對流系統環境及雙偏極化觀測結果之定量分析，配合與過去文獻之比對，加強本次龍捲風是由迷你超級胞發激發之論點。

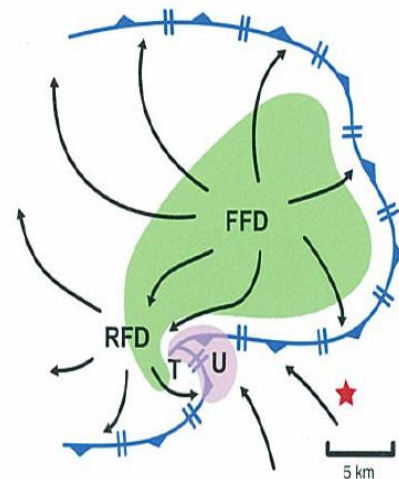


圖 1. Lemon and Doswell(1979)提出之超級胞概念模式。粉色 U 為上升氣流區，T 字位置為龍捲風發生之位置；綠色為下沉氣流區，又分為前側下沉氣流(FFD)及後側下沉氣流(RFD)。(圖摘錄自 Markowski and Richardson 2010)。

## 二.對流系統環境分析

根據李等(2019)採用社群資料攀爬的技術，透過關鍵字針對當日下午龍捲風相關之公開災情照片及影片進行收集、彙整及定位之結果，本次龍捲風為東南向西北方向移動，與過去研究的案例(張與劉 2016；Suzuki et al. 2000)均為向右側移動，本龍捲風為向左側移動，是較為罕見的個例。李等(2019)亦使用 NCEP GFS 0.5° 全球模式分析場分析當日上午之綜觀環境條件。結果顯示，當時臺灣處在一大低壓帶環境，受低壓帶環流影響，臺灣附近之低層大氣盛行偏南至東南風(與龍捲風移動之方向一致)。也由於地形(中央山脈)之阻擋，臺灣海峽為偏北風，大環境之東南風與海峽之北風，在臺灣南部形成一個輻合帶。配合 850hPa 高相當位溫、500hPa 分流場及 200hPa 臺灣南部上空之輻散區，

都顯示當日之綜觀環境條件是有利對流系統發展的。本研究進一步使用當日上午 8 時之屏東探空站資料，分析當日臺灣南部之環境特性。結果顯示，當日對流可用位能(CAPE)約  $493\text{JKg}^{-1}$ ，中低層(0-6 公里)有明顯風切約  $11.9\text{ms}^{-1}$ ，風暴相對螺旋度為  $32.6\text{m}^2\text{s}^{-2}$ ，提供低層水平渦度，透過上升運動轉換為垂直渦度。圖 2 為利用當日屏東探空資料繪製的風徑圖，從圖中明顯發現，地面至 500hPa 的風向隨高度順轉，有利於中尺度渦旋發展，風暴移動方向也偏向平均風之右側，與 Suzuki et al.(2000)提出之有利迷你超級胞激發龍捲風之環境條件相符。

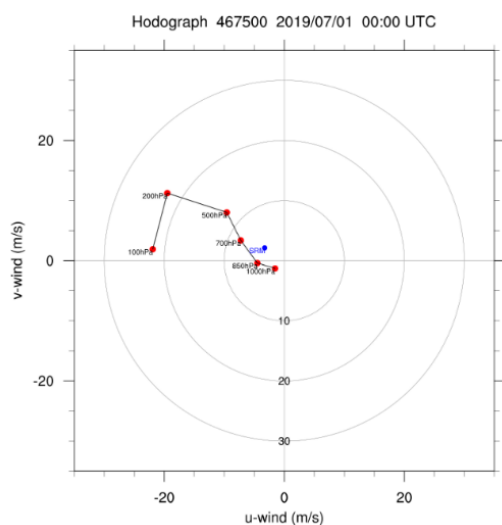


圖 2. 2019 年 7 月 1 日 0800LST 之屏東探空站探空資料繪製之風徑圖。

### 三. 雙偏極化雷達觀測特徵分析比對

高雄林園 C 波段雙偏極化雷達(RCKS)，於 2017 年底上線執行觀測任務，也使得本次屏東龍捲風成為臺灣首例被雙極化完整觀測之陸地龍捲，加上龍捲風發生之位置距離林園雷達僅約 12 公里，使得激發龍捲之對流系統其雷達觀測細緻特徵得以被完整分析。李等(2019)已針對本次事件之雙偏極化雷達觀測特徵，進行定性的分析描述，例如：勾狀回波(Hook Echo)、弱回波區(WER)、龍捲風沙塵特徵(TDS)、弧形差異反射率(Zdr Arc)、柱狀差異反射率(Zdr Column)及柱狀比差異相位差(KDP

Column)等，本研究將進一步定量分析這些雙偏極化特徵，並與美洲大陸之超級胞進行比對。

圖 3 為利用林園雷達 2019 年 7 月 1 日 15 時 04 分觀測資料，分析激發龍捲風之對流系統的垂直結構。圖中，除可明顯看到勾狀回波及弱回波區外，也可看到冰雹的特徵，且冰雹的位置與美洲大陸超級胞相仿(Markowski and Richardson 2010)。此外，圖中強回波發展高度(>45dBZ)僅可分析至 7 公里高，係因為對流系統距離林園雷達太近，最高仰角(29.9 度)僅可觀測到此高度，故無法順利觀測到回波頂(Echo Top)。

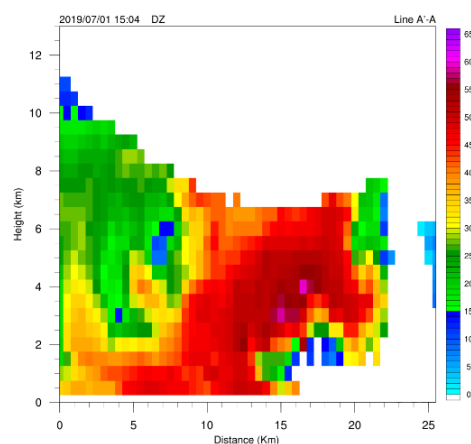


圖 3. 激發屏東龍捲風之對流系統垂直剖面分析，弱回波區位在圖中 X=15~20 公里，高度 0~2 公里。圖中回波大於 60dBZ 則是冰雹的現象 (X=15~17 公里，Y=3~4 公里)。(圖節錄自李等(2019)，本研究重新繪製)

在超級胞的低層的雷達觀測特徵，除了勾狀回波、龍捲風沙塵特徵外，還有另外一個重要的特徵就是弧形的差異反射率(Zdr Arc)。根據 Kumjian and Ryzkov (2008)的研究，在 S 波段的觀測下，弧形差異反射率的大值約 4-5dB，若是在 C 波段雷達的觀測，甚至可以更高(可大於 6dB)。造成如此特徵的物理機制與強烈的上升、下沉氣流導致之水象粒子排序(Size Sorting)過程有關。由圖 4 可發現，在勾狀回波的對側，同樣存在一弧形的差異反射率相對大值區，最大值可達到約 6.5dB(林園雷達為 C 波段雷達)，與 Kumjian and Ryzkov (2008)研究相符。

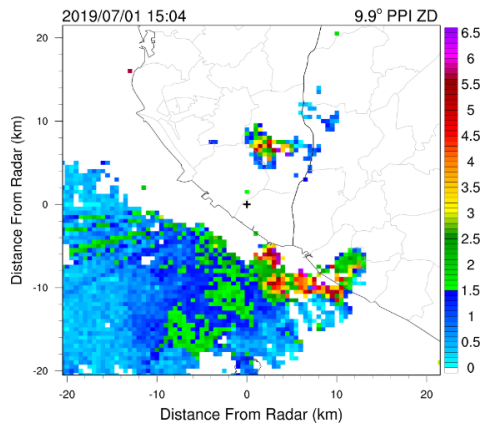


圖 4，2019 年 7 月 1 日 1504(LST)，林園雷達 9.9 度仰角差異反射率(Zdr)之觀測結果。(圖節錄自李等(2019))。

李等(2019)的分析中，已發現激發屏東龍捲風的對流系統具有柱狀差異反射率(Zdr Column)及柱狀比差異相位差(K<sub>DP</sub> Column)的特徵，且柱狀結構具有傾斜及柱狀比差異相位差位在柱狀差異反射率西側的現象(圖 5)。根據 Caylor and Illingworth (1987)、Conway and Zrnić(1993)的研究，超級胞相較於其他劇烈對流系統，其柱狀差異反射率的寬度相對較為狹窄，僅約 4-8 公里寬，垂直發展高度易超越融解層。分析圖 5，柱狀差異反射率的寬度(>2dB)約 4 公里，發展高度約 5 公里；柱狀比差異相位差(大於 2° Km<sup>-1</sup>)，則是發展至 6 公里高，由當日探空資料可知 0 度線約在 500hPa，所以兩者均發展至融解層以上。上述這些特徵與數據結果，都與 Kumjian and Ryzkov (2008)研究美洲大陸超級胞之特徵相符。

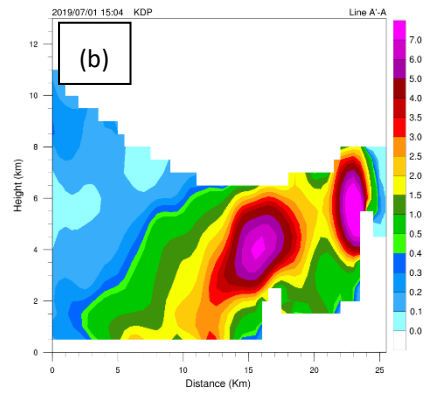
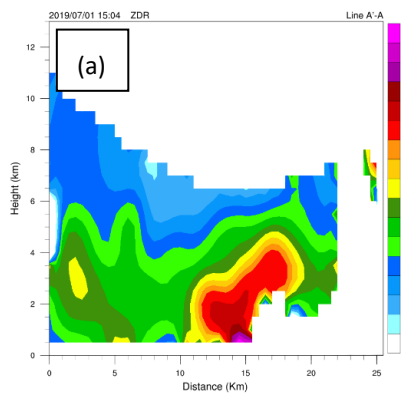


圖 5. (a)差異反射率(Zdr)之垂直剖面;(b)比差異相位差(KDP)之垂直剖面。(圖節錄自李等(2019)，本研究重新繪製)

## 四.結論

2019 年 7 月 1 日午後約莫 3 時，屏東縣林邊鄉發生龍捲風，造成當地建物、路牌及農作物受損。龍捲風的訊息，第一時間透過社群網路、即時新聞廣為流傳。根據李等(2019)透過社群資料攀爬技術與定位，判定此次龍捲風為東南向西北移動。在環境條件分析部分，李等(2019)使用 NCEP GFS 0.5° 全球模式分析場證明當時的綜觀環境條件有利劇烈對流發展，本研究進一步使用屏東探空分析當日臺灣南部地區之對流環境特性，當日對流可用位能 493JKg<sup>-1</sup>、中低層有明顯風切、地面至 500hPa 的風向隨高度順轉、風暴移動方向偏向平均風右側，這些都與文獻指出有利於迷你超級胞激發龍捲風的大氣環境條件相符。雙偏極化雷達觀測特徵分析部分，李等(2019)已證明激發本次龍捲風的對流系統具有勾狀回波、弱回波區、龍捲風沙塵特徵等特徵，本研究進一步將這些特徵與美洲大陸超級胞的觀測結果比對，包含弧型差異反射率大值約 6.5dB；柱狀差異反射率(大值約 4.5dB，大於 2dB 的寬度約 4 公里)、柱狀比差異相位差(大於 2° Km<sup>-1</sup>發展至 6 公里高)，都與美洲大陸超級胞事件之觀測結果相仿。

表 1 為本研究整理 Suzuki et al. (2000)分析美國典型超級胞龍捲及兩個分別由颱風或颶風引起之迷你超級胞龍捲；張與劉(2016)分析之台南新化

迷你超級胞龍捲及本研究分析之屏東龍捲風事件之環境特性及觀測特徵比較表。表中可以清楚發現，屏東龍捲風事件是唯一一個被雙極化雷達觀測之個案，因此在觀測現象具有更多細緻的超級胞觀測特徵；對流系統的生命期，本次事件與台南新化龍捲風較為接近，遠低於其他 3 場事件；在中尺度渦

漩的比較上，本次事件的水平、垂直尺度與另外 3 個迷你超級胞事件相仿；環境特性分析部分，包含低層有風切、風向隨高度順轉、系統移動偏向平均風右側、回波頂的發展高度都與 3 個迷你超級胞龍捲事件雷同。根據上述比較結果，本研究認為本次屏東龍捲風也是由一個迷你超級胞所激發。

表 1. 本研究整理 5 個超級/迷你超級胞之觀測特徵、中尺度渦漩及環境特性比較表。前 3 欄數據節錄自 Suzuki et al. (2000)、第 4 欄數據由本研究自張與劉(2016)整理而得、屏東龍捲風數據則是本研究分析取得。

	Typical supercells over Great Plains	Mini supercells associated with T9019	Supercellular storms associated with Danny	2015.07.20 台南新化龍捲風	2019.07.04 屏東林邊龍捲風
Morphology	Hook echo, BWER, WER	Hook echo, BWER, WER	Hook echo, wall cloud	Hook echo, WER	Hook echo, WER, TDS, Zdr Arc, Zdr, Kdp Column
Storm's Life Time	Several hours	3 h in average	Long life	15 mins	~15mins
Horizontal of MC	5.7 km (an average)	1–4 km	Unknown	3~4km	~4km
Vertical scale of MC	Deep ( $\frac{2}{3}$ of storm depth)	Lower than 5 km	Unknown	3.5km	~4km
Height of initial MC	5 km	2–3 km	Unknown	Unknown	Unknown
Storm motion relative to mean wind	Rightward deviation and slower movement	Little rightward deviation and slower movement	Little rightward deviation and slower movement	Little rightward deviation and slower movement	Little rightward deviation
Ehco Top Height	Higher than 10 km	Lower than 10 km	Lower than 10 km	Lower than 10 km	>7km
Hodograph	Strong deep vertical wind shear with curvature	Strong vertical wind shear with curvature below a few km AGL	Strong vertical wind shear with curvature below a few km AGL	500hPa 以下有垂直風切，風向隨高度順轉	500hPa 以下有垂直風切，風向隨高度順轉
CAPE (J/kg)	2542 (avg for Oklahoma)	1600	1984	3.84	493
SREH (m2 s-2)	Medians are 278, 330, and 531 for F0–F1, F2–F3, and F4–F5 tornadoes	310	263	56.66	32.6

## 參考文獻

張怡蕙、劉清煌，2016：2015 年 7 月 20 日臺南新化龍捲風個案分析。《大氣科學》，44，237–264。

李宗融、廖信豪、王安翔、林忠義、于宜強、劉致灝：2019 年 7 月 1 日屏東龍捲風雙偏極化雷達觀測分析。《國家災害防救科技中心電子報》，第 170 期。

- Caylor, I.J. and A.J. Illingsworth, 1987: Radar observations and modeling of warm rain initiation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **113**, 1171-1191.
- Conway, J.W. and D.S. Zrnić, 1993: A study of embryo production and hail growth using dual-Doppler and multiparameter radars. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2511-2528.
- Kumjian, M. R., and A. V. Ryzhkov, 2008: Polarimetric Signature in Supercell Thunderstorms. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **47**, 1940-1961.
- Lemon, L. R., and C. A. Doswell III, 1979: Sever thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis. *Mon. wea. Rev.*, **107**, 1184-1197
- Liu, C.-H., 2010: A waterspout observed under weak southwesterly flow near Kaoshiung on 7 July 2010, *Third SoWMEX/TiMREX Science Workshop*, 3-5 November 2010, Taipei, Taiwan.
- Loney, M.L., D.S. Zrnić, J.M. Straka, and A.V. Ryzhkov, 2002: Enhanced polarimetric radar signatures above the melting level in a supercell storm. *J. Appl. Meteor.*, **41**, 1179-1194.
- Markowski, P and Y. Richardson., 2010: Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. Penn State University, PA, 407pp.
- Suzuki, O., H. Niino, H. Ohno, and H. Nirasawa, 2000: Tornado-producing mini supercells associated with typhoon 9019. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1868-1882.

## Observational analysis of the July 1<sup>st</sup>, 2019 Pingtung tornado

Tsung-Jung Lee<sup>1</sup>, Hsin-Hao Liao<sup>1</sup>, Chung-Yi Lin<sup>1</sup>, An-Hsiang Wang<sup>1</sup>, Chih-Hao Liu<sup>2</sup>

Meteorology division<sup>1</sup> Information division<sup>2</sup>

National Science and Technology Center for Disaster Reduction

### Abstract

On the afternoon of July 1<sup>st</sup>, 2019, a tornado hit Linbein Township, Pingtung County, Taiwan. The photos and videos of the tornado were quickly transmitted through social media and online news, and the high-speed rotating funnel cloud and its rapid movement are clearly seen. This research applied web crawler technique to collect the videos and disaster photos of the tornado which were released to the social media by the public. After positioning the filming locations of the photos and videos, it was confirmed that the tornado moved northwestwards from the southeast of Linbein, consistent with the environmental wind field.

The Kaohsiung Linyuan dual-polarization radar (C-band) was launched for operation at the end of 2017, making this tornado the first one occurring on land and observed by the dual-polarization radar in Taiwan. This research applied Linyuan radar data to analyze the polarimetric signature of the deep convection system which triggered the tornado. The result showed this tornado had a lot of features similar to the ones triggered by supercells in the United States, such as the hook echo, WER, mesoscale cyclone, tornado debris signature (TDS), Zdr arc, Zdr column and Kdp column. The characteristics of the storm environment were also analyzed. It was found that the convective available potential energy was 493 J/Kg, the low level had strong shear with veering, and that the storm deviated rightward relative to the mean wind shear. Compared with previous studies, the preliminary result indicated that the Pingtung tornado was triggered by a mini-supercell.

Key word: tornado, mini supercell, polarimetric signature