

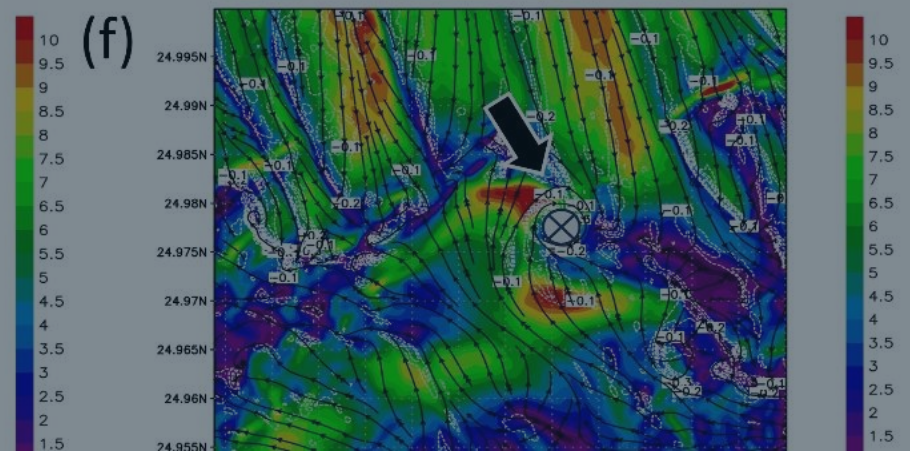
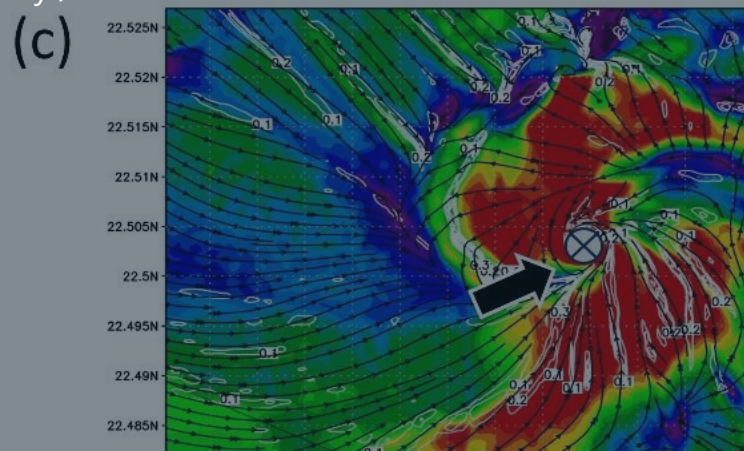
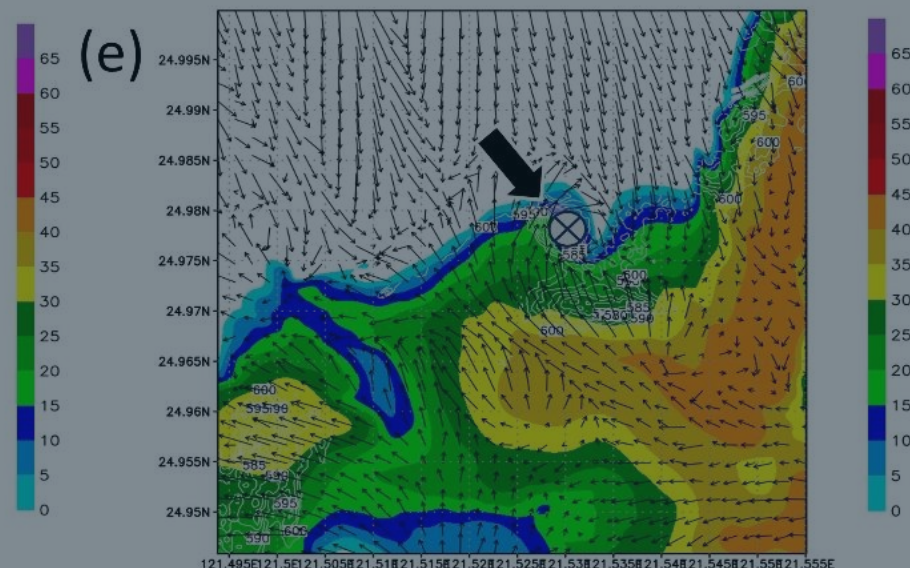
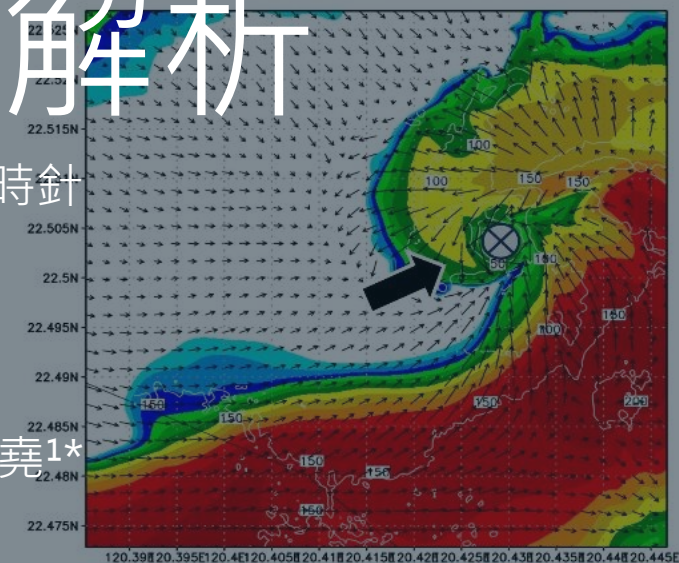
臺灣龍捲風的超高 解析度模擬解析

利用 40 m WRF-LES 解析順時針與逆時針
非超級胞龍捲風之生成機制

陳致穎¹ · 魏志憲² · 蕭鋒³ · 喬森³ · 林傳堯^{1*}

¹ 中央研究院 · ² 中華航空 · ³ Howard University /
NCAS-M

氣象署115年天氣分析預報研討會



從夏威夷到臺灣：驗證島嶼型龍捲風假說

2003 年歐胡島個案為臺灣兩個個案提供機制上的前導基礎

歐胡島 2003 · 關鍵觀察

在深對流抵達之前，近地面已先形成乾燥渦旋。海風與對流外流共同產生局地風切 / 輻合，維持此前驅環流。

垂直耦合

隨著對流接近，渦管由約 1 km 向上延伸至 2–2.5 km，並透過快速拉伸而增強；數分鐘內即發生龍捲風生成。

臺灣個案欲驗證的假說

此由下而上的生成路徑，究竟只是夏威夷特定個案的機制，還是可適用於不同地形、綜觀環境與渦旋極性的普遍島嶼型龍捲風生成架構？

本研究發展脈絡

夏威夷 2003

海風 + 對流外流
→ 近地面渦旋
→ 對流耦合



臺灣 2011 順時針

鋒面 / 地形偏轉氣流
→ 負渦度渦旋
→ 拉伸



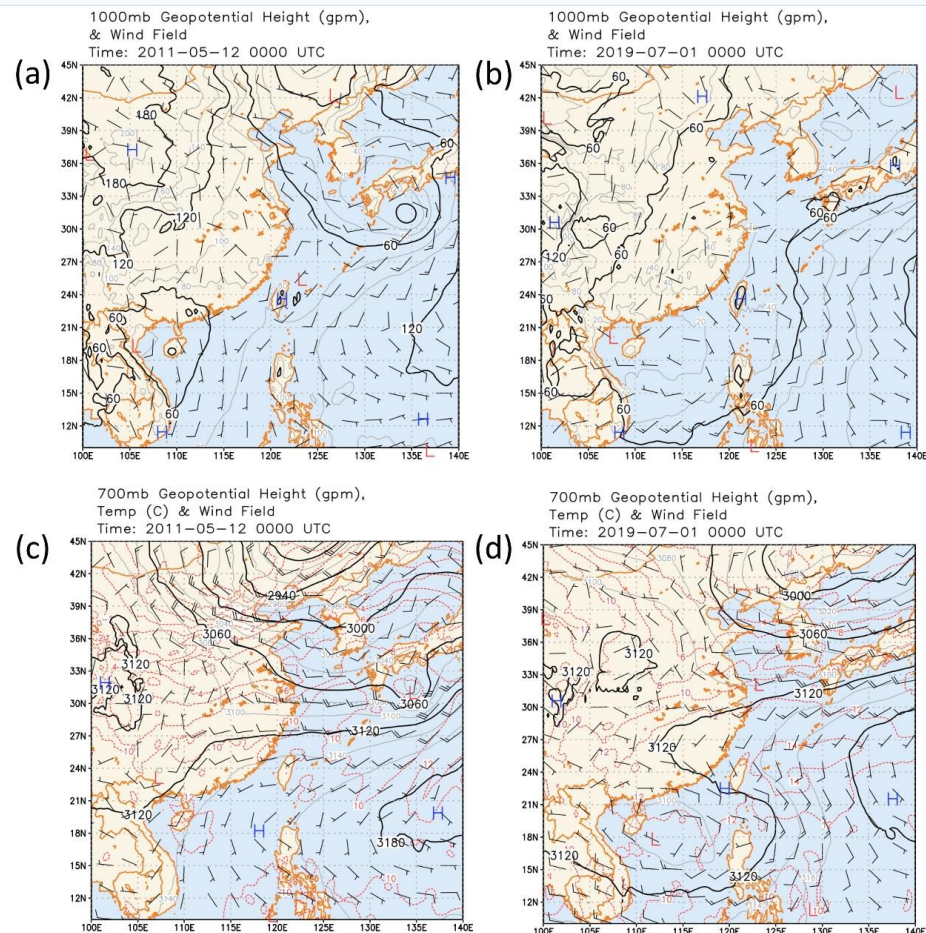
臺灣 2019 逆時針

熱帶高 CAPE 環境
→ 正渦度渦旋
→ 拉伸

臺灣兩個個案可用以檢驗：夏威夷所提出的由下而上機制，是否能推廣至相反渦旋極性與不同環境條件。

臺灣驗證個案：不同環境與相反渦旋極性

2011 新店：順時針 (CW) | 2019 林邊：逆時針 (CCW)



2011 CW · 梅雨鋒面環境

最大 CAPE $\approx 1952 \text{ J kg}^{-1}$

CIN = 0 J kg^{-1}

LCL $\approx 897 \text{ hPa}$

強烈鋒面 / 地形偏轉造成的低層風切

→ 動力條件有利於淺層順時針渦旋

2019 CCW · 熱帶環境

最大 CAPE $\approx 3284 \text{ J kg}^{-1}$

CIN = 0 J kg^{-1}

LCL $\approx 851 \text{ hPa}$

深厚暖濕入流 + 強烈日間不穩定

→ 對流旋轉快速爆發增強

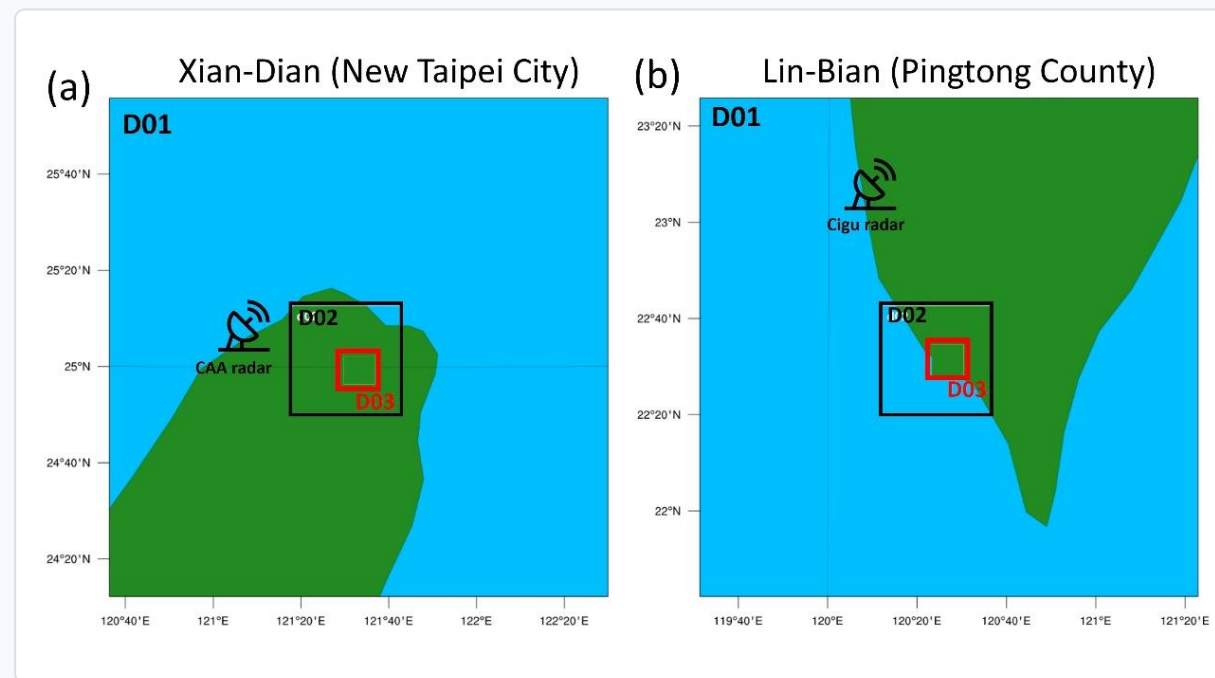
共同條件

儘管綜觀環境不同，兩個個案皆達到 CIN = 0 且雲底低，有利於近地面渦度快速與對流上升氣流耦合。

相反的旋轉方向源自不同的局地氣流結構，而非單一固定的綜觀天氣型態。

實驗設計：由中尺度強迫至龍捲風尺度 LES

三層 WRF 巢狀網格銜接 1 km → 200 m → 40 m



WRF 巢狀網格與雷達位置

模式架構

WRF v3.6.1 · 38 層垂直層
D01 : 1 km · MYNN PBL
D02 : 200 m · 三維 LES
closure
D03 : 40 m · 三維 LES
closure
最小時間步長：0.24 s

物理參數化與驅動資料

Goddard 微物理 · RRTMG 輻射 · Pleim-Xiu 陸面模式
2011：CFSR 初始 / 邊界條件
2019：GFS 初始 / 邊界條件

觀測資料驗證

使用民航局桃園雷達 (2011) 與氣象署七股雷達 (2019) 的 0.5-km CAPPI 回波、徑向速度與反演水平風場進行驗證。

採用低於 100 m 的解析度，直接解析短生命期渦旋核心及其與對流上升氣流的耦合。

40 m WRF-LES 成功重現兩個龍捲風尺度渦旋

觀測漏斗雲與模擬近地面環流呈現一致的事件尺度特徵

逆時針
(2019)



順時針
(2011)

2011 順時針

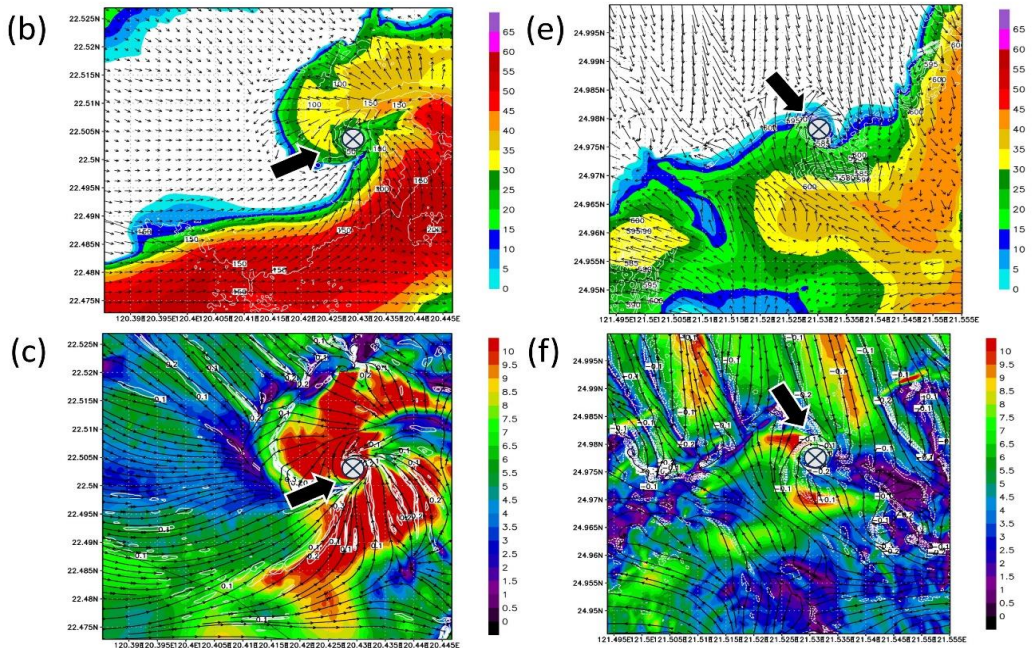
新店附近重現緊密的反氣旋式 / 順時針環流，並嵌於較淺的對流系統中。

2019 逆時針

林邊附近形成緊密的氣旋式 / 逆時針渦旋，伴隨較強對流與更強的近地面風速。

模式能力

模擬對渦旋位置、發生時間與環流結構的掌握，足以進一步診斷其生成路徑。



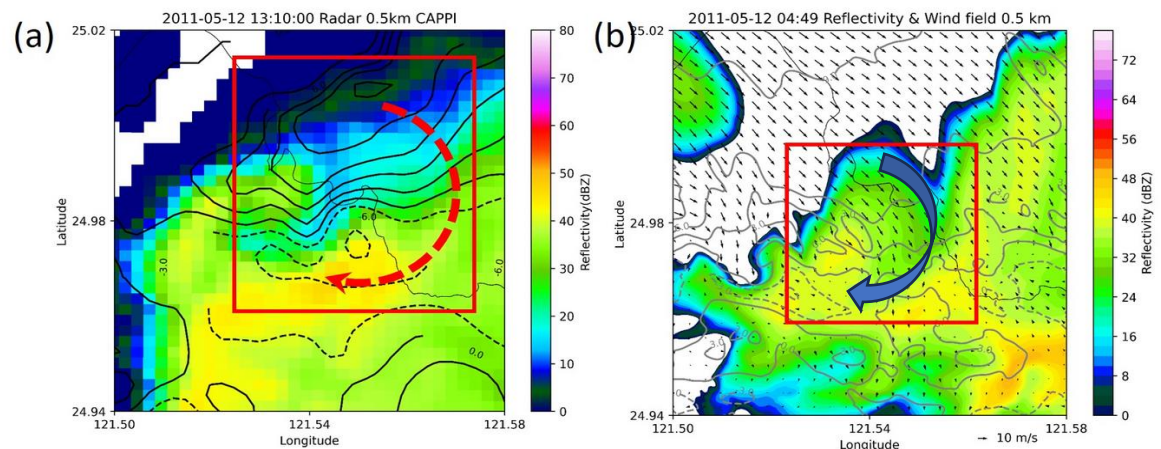
目擊照片與模擬回波、氣壓、風場及渦度

本研究的關鍵進展不僅是重現對流系統，更在於直接解析龍捲風尺度環流。

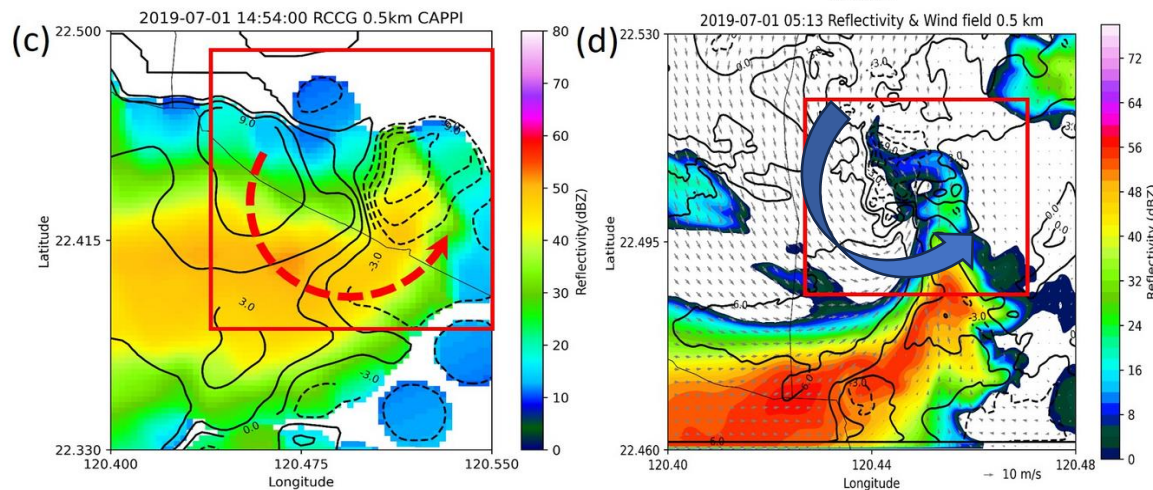
雷達驗證：母雲對流與低層旋轉

觀測與模擬的 0.5-km CAPPI 結構提供獨立的動力驗證

順時針
(2011)



逆時針
(2019)



雷達觀測與 40 m WRF 模擬比較

一致之處

兩個個案皆能重現主要對流區、低層輻合、回波組織及旋轉訊號。

差異之處

精確發生時間、位置偏移及都卜勒速度強度仍有差異；對於快速演變且高度敏感於初始條件與地形的微尺度渦旋而言，此差異屬可預期。

結果

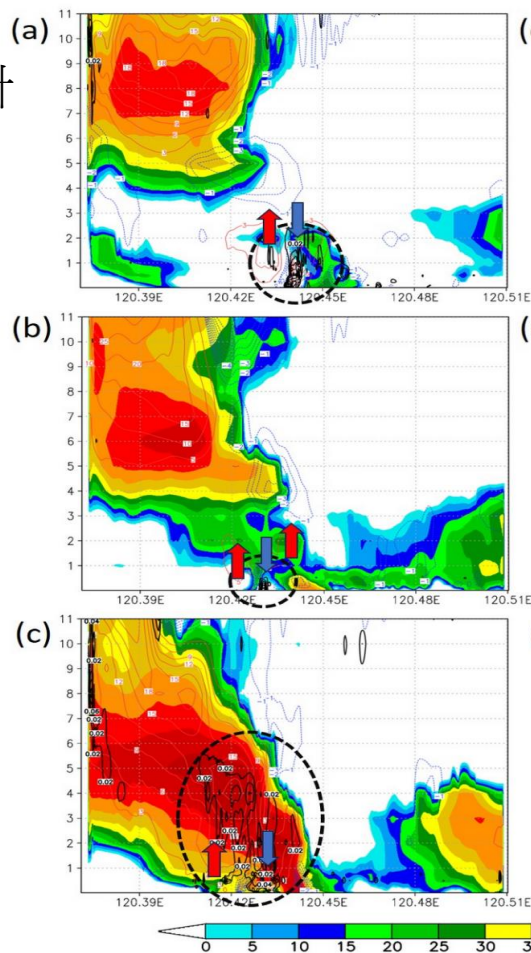
雷達觀測一致性支持WRF使用LES預測出的物理過程，但龍捲風核心的絕對強度仍須進一步分析。

儘管不預期微尺度相位能完全吻合，模擬在對流系統尺度上仍具動力可信度。

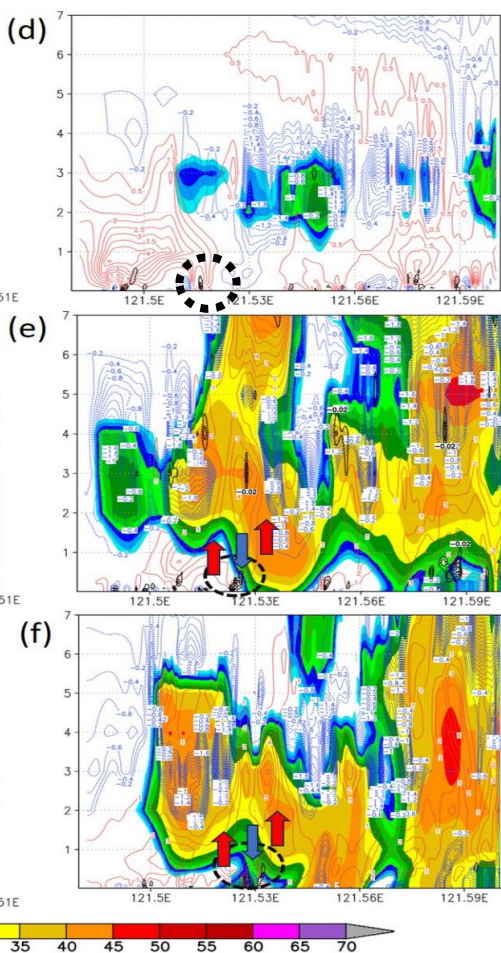
垂直演變呈現兩種不同的增強型態

回波、上升氣流與渦度剖面揭示渦旋耦合的深度與時序

逆時針
(2019)



順時針
(2011)



2019 逆時針與 2011 順時針個案的垂直對流演變

2019 逆時針：爆發式耦合

約 10 分鐘內，回波超過 55 dBZ、上升速度超過 6 m s^{-1} ，且深厚正渦度柱向上發展至約 4–5 km。

2011 順時針：淺層動力渦旋

對流較弱且較破碎；負渦度核心主要集中於約 500–600 m 以下。

共同特徵

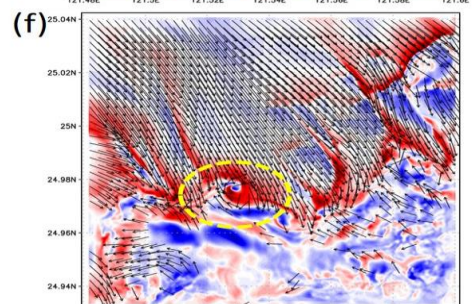
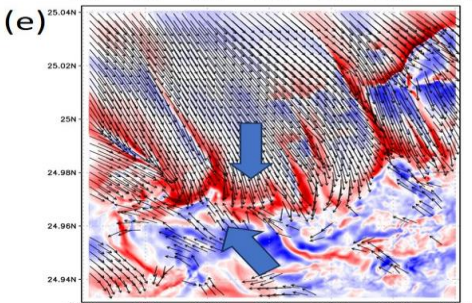
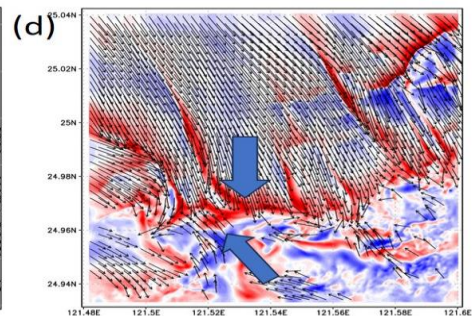
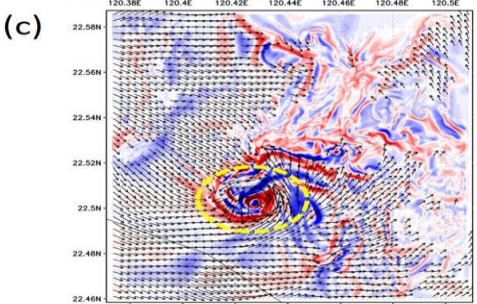
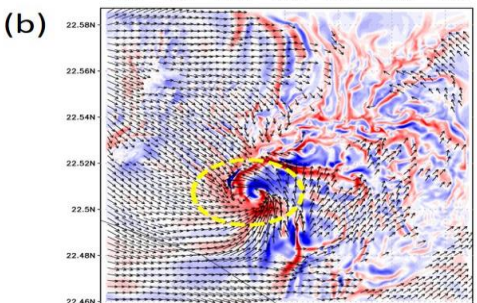
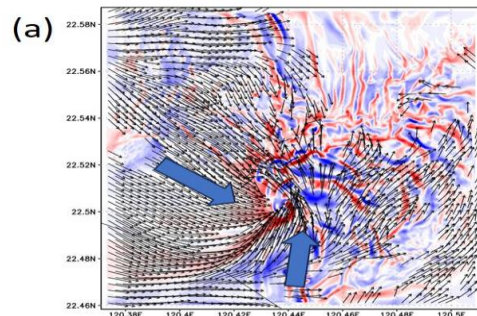
近地面旋轉先行出現，當其與對流上升氣流對齊後迅速增強，符合垂直由下而上的耦合機制。

熱力不穩定強度控制耦合深度與增強速度，但兩個個案皆由低層旋轉開始。

近地面渦度在龍捲風生成最盛期前即開始組織化

平面演變顯示龍捲風尺度核心快速整合

逆時針
(2019)



順時針
(2011)



模擬垂直渦度與地面風場演變

2019 逆時針

正渦度在約 10 分鐘內由 ~ 0.5 增至 > 2.0 PVU，形成緊密環狀環流與強切向風。

2011 順時針

負渦度 / 順時針旋轉較緩慢增強，空間上仍較破碎且垂直結構較淺。

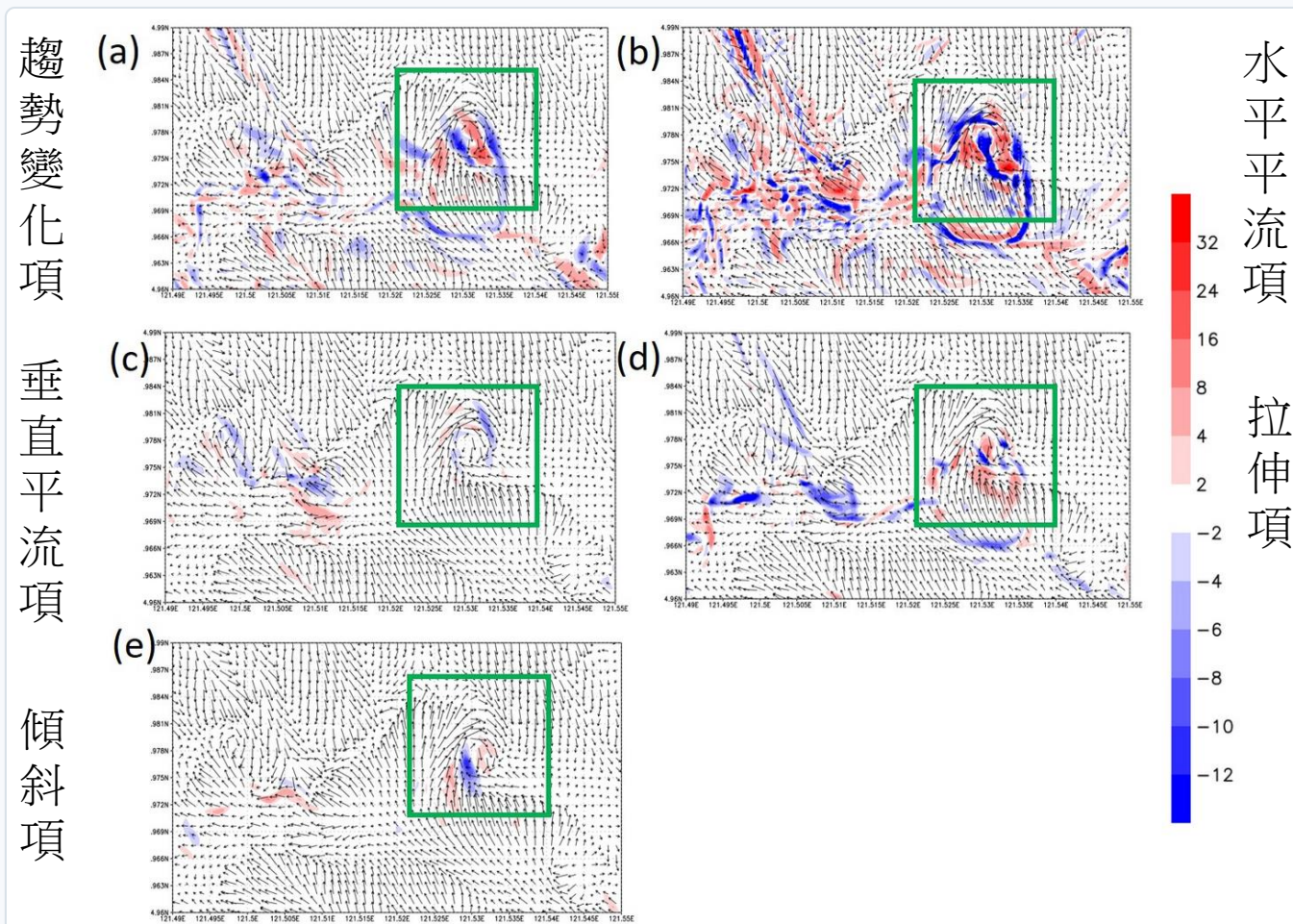
預報訊號

低層渦度由分散轉為緊密閉合環流，可視為對流解析 / LES 尺度下的潛在前兆訊號。

關鍵轉變在於渦旋核心的整合，而非僅僅存在環境風切。

渦度收支 — 2011 順時針龍捲風

成熟淺層渦旋以拉伸項為主，水平平流為次要貢獻



2011 年 5 月 12 日 05:34 UTC · 500 m 渦度收支

1 · 拉伸項

核心附近最大正貢獻： $> +14 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

2 · 水平平流項

約 $+6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的正貢獻，將渦度輸送至核心區域。

3–4 · 垂直平流 / 傾斜項

垂直平流呈零散分布 ($\leq +3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)
；傾斜項最小 ($\approx \pm 1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)。

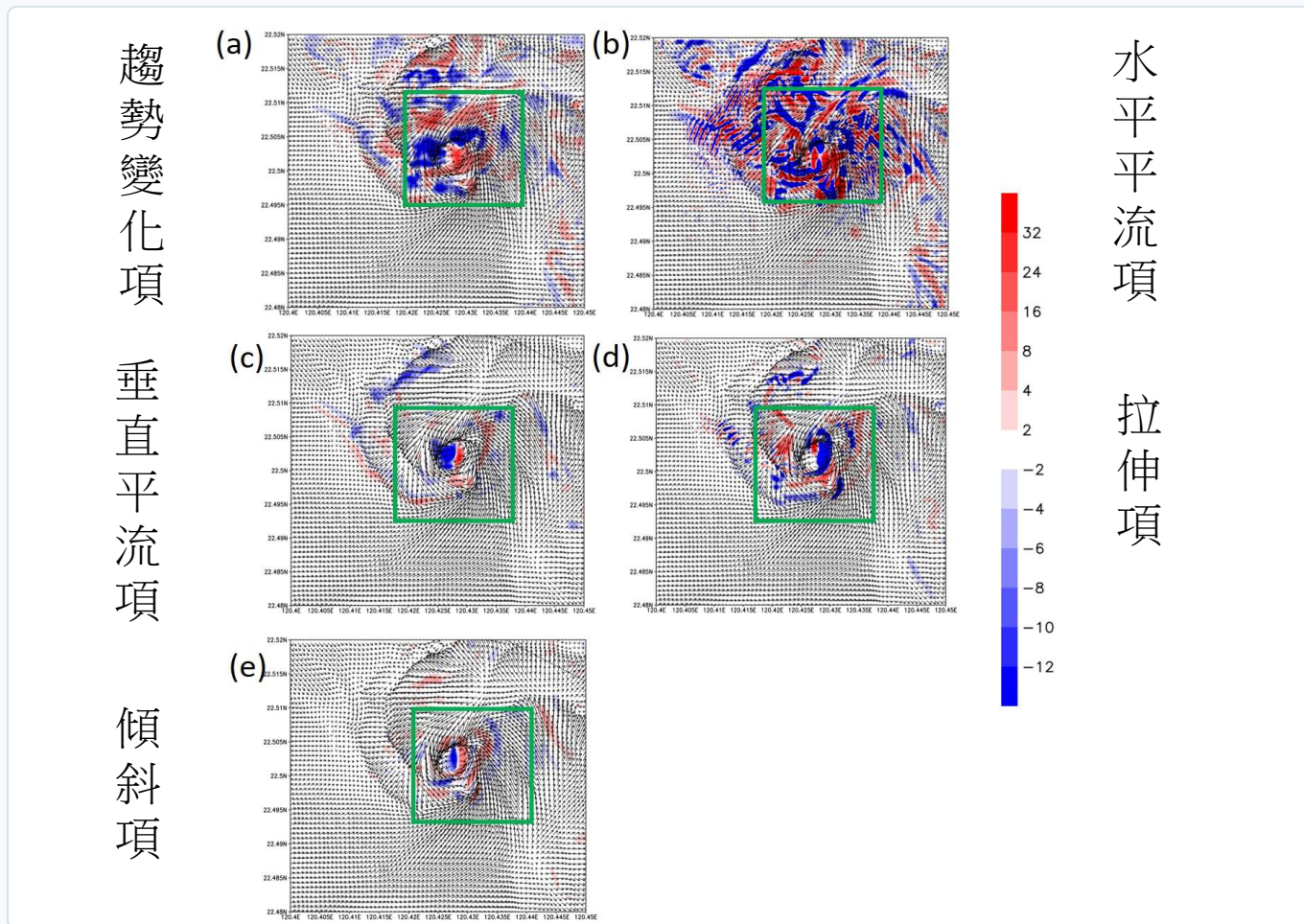
機制意涵

此順時針龍捲風主要由既有近地面渦旋的垂直拉伸而增強，而非典型由傾斜項主導的生成機制。

2011 CW：拉伸 + 水平輸送共同增強由地形組織的淺層渦旋。

渦度收支 — 2019 逆時針龍捲風

拉伸項仍為主導，而傾斜項成為具意義的次要過程



1. 拉伸項

核心貢獻超過 $+24 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ，為最強的正渦度來源。

2. 傾斜項

可達 $\sim \pm 12 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ，有助於將風切產生的水平渦度轉換為垂直渦度。

3-4. 平流項

水平平流主要重新分配渦度；垂直平流則在下沉氣流區造成局地負渦度趨勢。

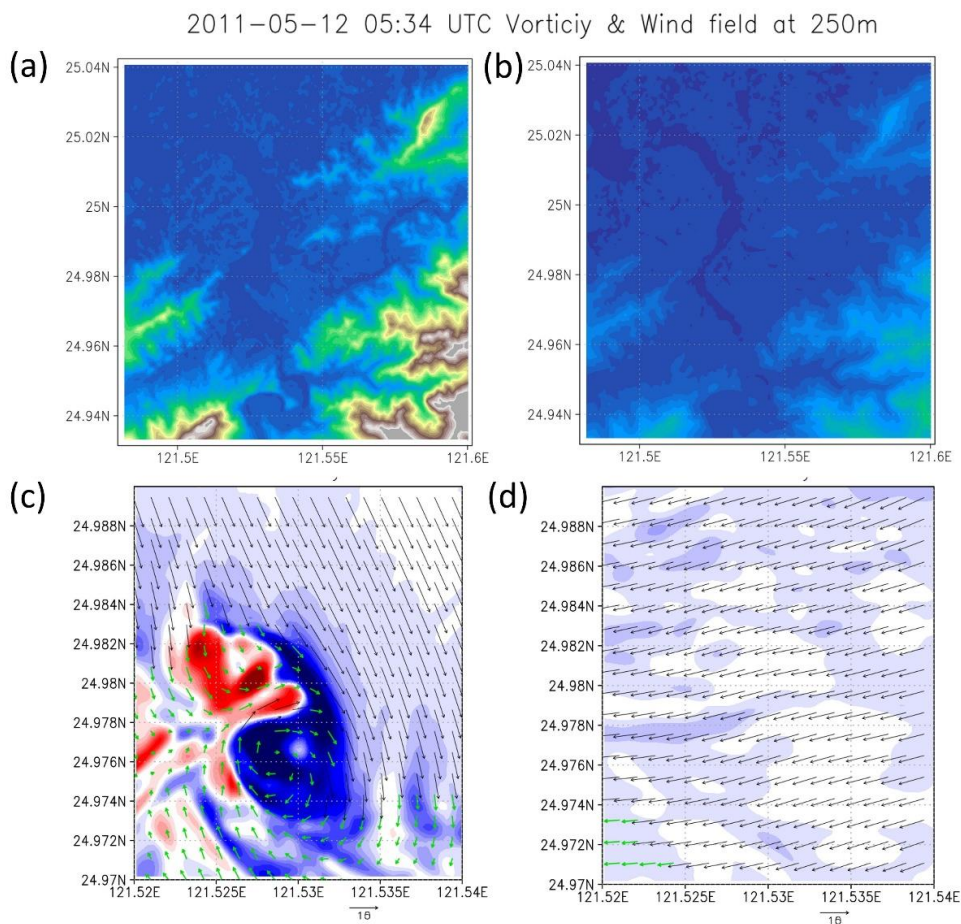
機制意涵

高 CAPE 強化對流上升氣流，使由下而上的快速拉伸得以發生；同時傾斜作用塑造更深厚的渦度柱。

2019 CCW：具有相同的由下而上核心機制，但更強對流使耦合更深，傾斜項貢獻也加大。

地形敏感度 — 2011 順時針龍捲風

地形高度降低 70% 後，組織化的負渦度核心幾乎消失



2011 CW 個案 CTRL 與 HGT_70%off 比較

CTRL_run

原始地形可維持新店附近集中的近地面負渦度核心與閉合順時針環流。

HGT_70%off

組織化中心幾乎消失；風場趨於均勻，僅剩微弱且零散的渦度擾動。

地形作用

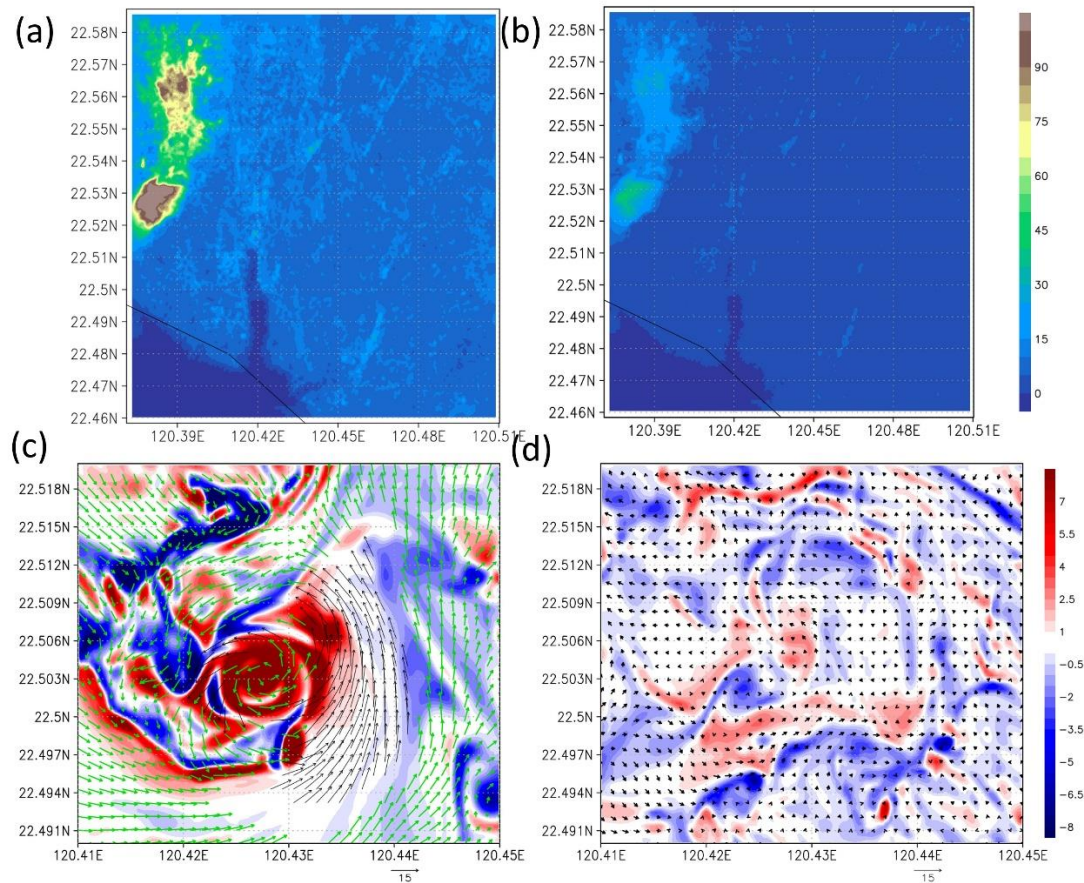
局地山脈與盆地幾何形狀可組織輻合、氣流偏轉及海風交互作用，形成所需的前驅渦管。

對 2011 個案而言，複雜地形是第一階的動力控制因子，而非被動的下邊界條件。

地形敏感度 — 2019 逆時針龍捲風

當地形強迫大幅減弱時，組織完整的氣旋式渦旋亦隨之崩解

2011-05-12 05:34 UTC Vorticity & Wind field at 250m



2019 CCW 個案 CTRL 與 HGT_70%off 比較

CTRL_run

林邊附近形成強烈閉合氣旋式環流，正渦度核心與環狀風場位置一致。

HGT_70%off

僅殘留零散的正 / 負渦度，無法形成組織完整的龍捲風尺度渦管。

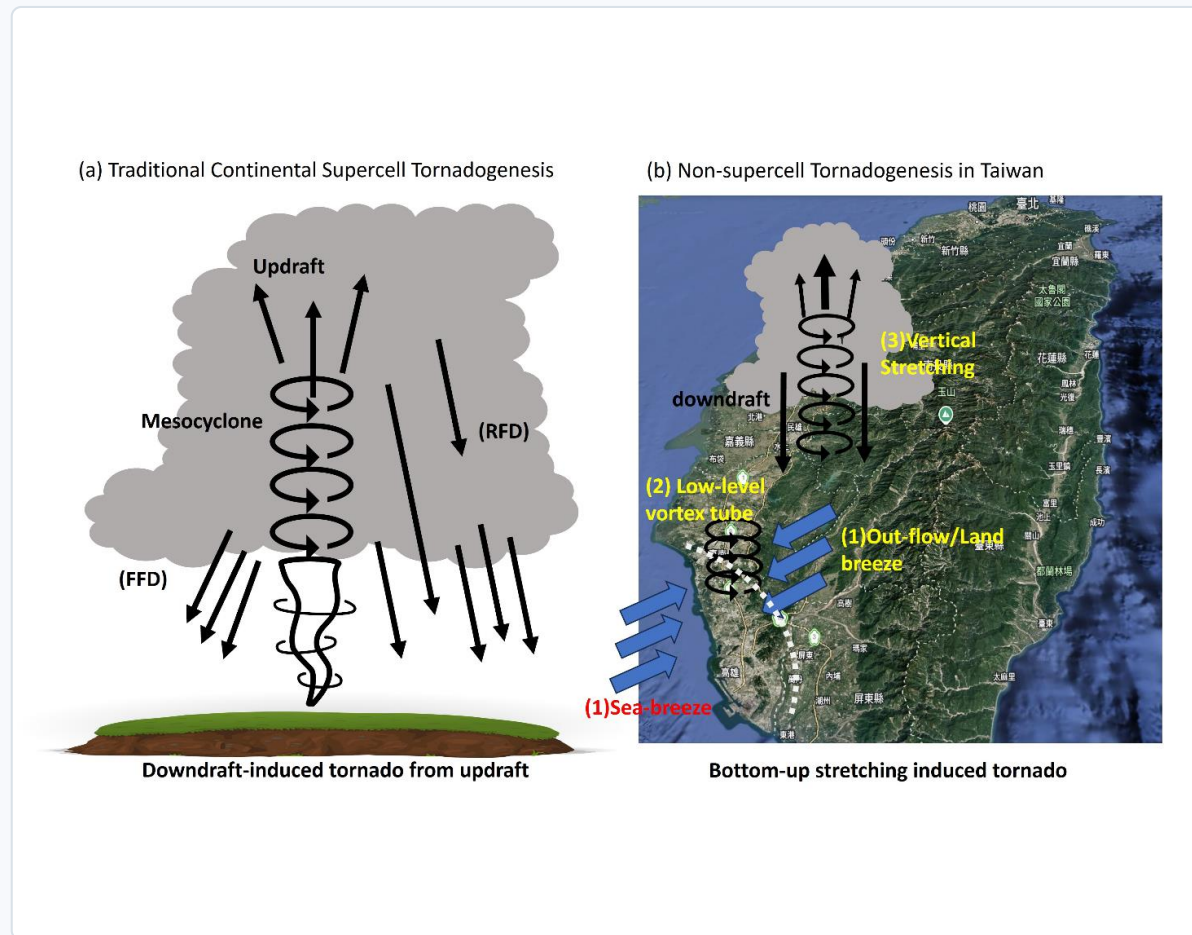
推論

儘管綜觀環境不同，地形在兩種渦旋極性個案中皆能促進對流、海陸風輻合以及阻擋 / 偏轉作用。

地形是連結這兩個原本差異顯著龍捲風事件的共同環境必要條件。

共通化的島嶼型由下而上生成架構

夏威夷 2003 + 臺灣 2011 CW + 臺灣 2019 CCW 指向共同的動力核心機制



臺灣概念模式：超級胞與島嶼型生成路徑比較

1. 產生局地渦度

地形調制氣流、海陸風與對流外流共同產生強烈近地面風切 / 輻合及前驅渦旋。

2. 渦旋極性由局地環流控制

既有局地風切的方向決定渦旋符號：2011 發展為 CW / 負渦度，而歐胡島 2003 與臺灣 2019 則發展為 CCW / 正渦度。

3. 對流耦合使渦旋增強

接近的上升氣流與前驅渦旋對齊，並透過垂直拉伸快速增強。儘管熱力不穩定強度與傾斜項貢獻不同，共同生成路徑皆為由下而上。

共通化機制：局地風切 / 輻合 → 近地面渦旋管 (水平) → 上升氣流耦合 → 拉伸 → 快速生成龍捲風；局地氣流幾何結構控制 CW 或 CCW。

結論

由夏威夷假說發展為三個案的島嶼型龍捲風生成架構

- 01 歐胡島 2003 首先顯示：近地面渦旋可先於對流存在，之後透過垂直耦合與拉伸而增強。(Chen et al. 2025)
- 02 臺灣 2011 CW 與 2019 CCW 儘管渦旋極性相反，且綜觀 / 熱力環境差異顯著，仍呈現相同的由下而上核心機制。
- 03 渦度收支顯示拉伸為主要增強過程；地形敏感度實驗則證實局地地形對組織臺灣個案的前驅渦旋至關重要。
- 04 綜合證據支持一套共同化的島嶼型龍捲風生成路徑：局地氣流幾何結構決定渦旋極性，而對流耦合控制其快速增強。

預報意涵：應同時監測地形 / 沿岸低層風切與輻合，以及快速增強的對流上升氣流。這類短生命期島嶼型龍捲風發生前，未必會先出現典型中尺度氣旋訊號。

謝謝聆聽!!

服務單位

環境變遷研究中心

中央研究院，臺北，臺灣

研究領域：數值天氣預報、資料同化、邊界層氣象、雷達／光達、人工智慧與環境應用。

#Open to
Work

學術資訊

ORCID: 0000-0002-2673-1317 → [Link](#)

Google Scholar → [Link](#)

Office Email: cycch6914@as.edu.tw

Personal Email: cychen6914@gmail.com

手機: +886-988-736-301

<https://kazamichen.netlify.app/zh/>



陳致穎 (Chih-Ying Chen)

中央研究院環境變遷研究中心