

卡玫基颱風(2008)引發澎湖地區強降水事件之數值模擬研究

蔡明憲¹、汪建良¹、侯昭平²、何台華³

¹國防大學理工學院環境資訊及工程學系 ²國防部陸軍司令部 ³龍華科技大學通識教育中心

摘 要

2008年卡玫基(Kalmaegi)颱風與西南氣流共伴在中南部引發豪雨成災,更在澎湖創下了最高日雨量紀錄。本研究使用WRF (Weather Research and Forecasting model) V3.1.1版,以數值模擬方式進行研究,探討卡玫基颱風影響台灣期間與西南氣流如何交互作用,在無地形舉升作用的澎湖地區產生強降水系統,以及雨帶為何在澎湖地區滯留。

本研究設計四層雙向巢狀網格,從2008年7月14日1200 UTC到19日1200 UTC進行五天的模擬。模擬結果顯示,自颱風中心出海起,西南氣流與颱風外圍環流在澎湖地區輻合,形成一條東-西走向的對流雨帶。此一輻合在澎湖地區造成強烈的上升氣流並進而造成強降水。在卡玫基颱風中心持續向西北移動的同時,此雨帶並未立即向西北移動,而是逐漸轉成東北-西南走向;約6小時後,雨帶減弱同時向北移動離開澎湖地區。這些特徵與雷達回波及徑向風場之觀測相符,但由於模擬颱風移速上之誤差,而在時間上有提早的現象。分析發現不同高度的輻合氣流來源不同,低層為颱風環流與西南氣流輻合。而3500 m高度則是西側來自大陸之西風氣流與颱風環流輻合,且兩支輻合氣流的熱力秉性不同,颱風環流較暖濕、西風氣流較冷乾,於是迫使颱風環流被舉升;而由南中國海北上之西風氣流,在大陸上空時風速便逐漸加大,在轉為西風到達輻合區後扮演「障壁(barrier)」的角色強迫颱風環流舉升後,仍持續加速沿台灣西側北上,風速最大達 36 m s^{-1} 以上。

關鍵字：卡玫基颱風，澎湖，強降水，WRF

一、前言

近幾年侵襲台灣的颱風中,有愈來愈高比例的災害肇因於強降水。究其原因,可能因科技與建築技術的進步,提高了對風災的抵抗力;或是因水土保持遭破壞,降低土地涵水能力,使地表逕流增強;也可能是因為部分颱風有降雨延時(duration)短而雨量大的特性。

2008年西北太平洋編號第7號颱風卡玫基(圖1),7月15日0600 UTC於菲律賓呂宋島東方海面生成,不久後向北北西方向移動,朝台灣東部沿海靠近。17日1340 UTC由宜蘭縣南部登陸,2320 UTC由桃園附近出海,18日0950 UTC進入大陸福建繼續向北移動。

卡玫基颱風影響台灣期間總計造成21人死亡、8人受傷、5人失蹤,以及12億元以上的經濟損失。其侵台期間之強度雖僅達輕度颱風,卻造成可觀的生命財產損失,主要乃因其降水特性為短延時之超大豪雨。而在卡玫基颱風出海後,7月18日0000 UTC至0600 UTC之間,於澎湖地區所形成之強降水雨帶,滯留時間約6小時,澎湖測站觀測到368 mm的雨量,平均時雨量超過60 mm。此一雨帶之形成與變化,可能受制於颱風環流與西南氣流之間的交互作用,此即為本研究欲探討的議題。

二、文獻回顧

李與蔡(1995)利用中正機場都卜勒雷達的觀測資料,針對亞力士(1987)、莎拉(1989)、歐菲利(1990)、楊希(1990)四個侵台颱風進行分析,探討颱風侵台時所伴隨雨帶之特徵;歸納出伴隨西南氣流之雨帶特徵為「上游為胞狀回波結構,但下游則轉為層狀回波型態」、「均出現於颱風後方」、「不隨颱風旋轉或移動」。

Hence and Houze (2008)於2005年以兩架飛機各搭載兩台(共計四台)機載都卜勒雷達對Katrina及Rita兩個颶風進行觀測分析,進一步歸納出颱風環流與外部氣流輻合形成的雨帶的運動場結構:颱風雨帶在高度3公里以下有來自雨帶外緣的內流,而雨帶的上游及中游為胞狀結構,往下游則胞狀降水頻率減少,轉為層狀降水;對流胞低層為颱風環流與外來氣流的輻合區,導致上升運動的發生,氣流及回波場隨高度向外傾斜,上升氣流在7到8公里高度轉而向外輻散。

由上述的研究發現,雨帶的形成和氣流的輻合有很高的關連性,因此本研究以颱風環流與西南氣流在澎湖地區如何交互作用、所形成局部環流之結構為探討方向。

三、實驗設計

本研究使用WRF模式進行數值模擬，模式版本為V3.1.1版。網格資料使用美國NCEP FNL全球分析場作為模式模擬之初始場及模擬中之邊界場，資料水平空間解析度為 $1^\circ \times 1^\circ$ ，垂直空間解析度為27層，時間解析度為每6小時1筆資料。以4層巢狀網格D01、D02、D03、D04（圖2），垂直層數為45層，模式層頂為30 hPa，D01水平間距27公里，網格點數 90×70 ，中心位於 115°E 、 22°N ；D02水平間距9公里，網格點數 106×136 ；D03水平間距3公里，網格點數 166×172 ，D04水平間距1公里，網格點數 181×181 ；使用雙向方式模擬。模擬時間自2008年7月14日1200 UTC起至2008年7月19日1200 UTC止，進行120小時積分。參數化法組合方面，微物理使用Morrison double-moment scheme、積雲使用new Grell 3d ensemble cumulus scheme、邊界層使用Asymmetric Convective Model version 2。模擬結果輸出時間間隔為10分鐘。模擬結果分路徑、強度、降水等方面分別進行校驗；其中降水校驗使用中央氣象局自動雨量觀測資料。卡玫基颱風影響台灣期間，中央氣象局共有385個自動雨量站，將記錄顯示9996、9997、9998、9999之錯誤記錄筆數達10%以上之測站捨去不用，進行資料檢定後捨去31個測站，餘下354雨量站資料；由7月16日0000 UTC至19日1200 UTC共84小時期間，以每24小時累積雨量取一樣本、每小時取樣一次之方式取樣61次，計 $61 \times 354 = 21594$ 筆雨量資料，進行降雨量模擬校驗：門檻值共10組：50、70、100、130、160、200、250、350、450、600 mm。

四、模擬結果校驗

本研究模擬的颱風路徑（圖3）在初期均向西移動（圖未示），後轉而向北，在登陸前才和最佳路徑逐漸靠近；登陸期間的路徑則相當一致，但在通過台灣期間移動速度略有誤差，模擬登陸時間較觀測延後約1小時50分，而通過台灣期間移速較觀測為快，使得模擬颱風出海較觀測提前約3小時40分，但出海後移速又較觀測為慢。綜合這些因素，導致模擬之澎湖地區降水，有提前發生而持續時間較久的結果。由於登陸期間的路徑模擬良好，且本研究探討澎湖地區發生強降水事件時間為中心出海後數小時，此時段路徑差異不大，不致影響降水機制的分析。

在颱風強度方面，模擬颱風中心最低氣壓為974.3 hPa，與觀測記錄970 hPa相當接近，可知強度模擬結果良好（圖略）。

在降水的校驗上，由累積雨量圖（圖4）顯示西南部平地累積降水有低估現象；定量得分方面，公正預兆得分為0.38、偏倚得分為0.79（圖5）、相關係數為0.820、均方根誤差為101.5 mm；而澎湖測站的降水亦成功模擬出強降水的特性，但發生時間提前約3小時（圖6）。

由模擬(D03)與觀測雷達回波圖的比較（圖7）顯示，在澎湖地區發生強降水的時間內，回波圖上也顯示出有一持續長時間（約6小時）的帶狀回波；且由模擬(D03)的850 hPa水平風場與CWB七股雷達觀測之徑向風場的比較（圖8）也顯示，在模擬中強降水發生期間澎湖附近850 hPa高度存在一強風軸；其投影在七股雷達所在位置的徑向風場，也與觀測1.5 km定高面徑向風場相似。由以上驗證推論在澎湖地區發生的降水過程，本研究之模擬與實際情況具有相當的一致性，因此，以下就模擬結果，對可能的降水機制進行討論。

五、降水機制分析

由發生降雨時間水氣輻合場的情形顯示，模擬第1筆強降水記錄時間（2008年7月17日2200 UTC，圖9a），颱風中心已由桃園出海向西北方向移動，此時925 hPa台灣中北部外海有明顯水氣輻合；18日0400 UTC時（圖9b），颱風中心逐漸接近大陸地區，此時水氣輻合帶合併連接為一條，同時此一已滯留6小時的水氣輻合帶逐漸由東西向轉為東北—西南向，並開始北移離開澎湖地區。

以上降水發生期間，由各高度6小時總水氣輻合量（圖10）顯示，強降水發生期間在澎湖地區有相當大的水氣輻合量，主要發生在低層並且隨高度遞減；至500 hPa已無明顯水氣輻合。

強降水發生時澎湖地區存在東西走向之雨帶，因此由澎湖地區南北向剖面圖，觀察輻合與對流演變之情形。在2100 UTC到2200 UTC時段中已有強對流運動發生，其中2140 UTC（圖11）在澎湖所在位置有高達 10 m s^{-1} 的上升速度。由水平風觀察發現，此時700 hPa以下高度在澎湖南側為西南西風、北側為西北西風，得知此時在澎湖明顯有輻合發生；可推測此輻合為上升運動發生的主因。雨帶滯留期間，最高曾經觀察到 18 m s^{-1} 的上升速度（圖略）。

為進一步釐清輻合氣流來源、特性與輻合帶的運動場結構，首先觀察西部外海不同高度氣塊軌跡圖。在圖12中，可以發現在澎湖地區輻合氣流的來源有高低層分離的現象，在約500 m高度主要分為西南氣流與颱風環流等兩支；約3500 m高度則分為颱風環流與西風氣流等兩支；其中西風氣流來源，主要是自南中國海北上進入大陸陸地之西南氣流，轉而向東形成之西風。

由D03的軌跡（圖13）顯示，直接自台灣海峽南端進入之低層西南氣流，從較高層的西風下方穿過後，與颱風環流輻合，並發生強烈的上升運動。且分別觀察731 m（圖14）及3534 m（圖15）高度之軌跡線時，更清楚地發現在3534 m高度、輻合帶以南之西風氣流，並未被舉升，而僅是水平的颱風環流轉為上升運動；且西風氣流在進入輻合帶時風速明顯地增

大。由圖16觀察則發現850 hPa到500 hPa之間上升運動的南北兩側環境熱力秉性不同，南側大氣位溫及相當位溫均較低，且相當位溫差異更大，顯示在850 hPa到500 hPa之間南側的大氣較冷且乾，因而提供由北側進入的氣流一個具有高不穩定度的環境，使其以很大的垂直速度上升，而產生強烈降水。

六、結論與未來工作

就本研究模擬結果而言，卡玫基颱風造成澎湖地區強降水期間，局部環流之運動場結構，如圖17所示，低層的部分是北側的颱風環流與南側的西南氣流輻合，產生垂直運動；而在3500 m左右的高度則是西側冷乾的氣流扮演barrier的角色，迫使北側的颱風環流舉升，產生垂直速度；且由於西風氣流提供對流不穩定度很大的環境，使得颱風環流得以加速上升，至高層後向外輻散。而西風氣流在大陸上空時風速便逐漸加大，在到達輻合區後，扮演強迫颱風環流舉升的「障壁(barrier)」角色。此一西風氣流並未轉為上升氣流，而是持續加速沿台灣西側北上，風速最大達 36 m s^{-1} 以上。至於低層更南側未輻合之西南氣流，在進入台灣上空穩定之大氣環境後，沿山脈舉升後下沉接近原高度，再轉為向北運動。

相較於Hence and Houze (2008)的研究結果，此處之中、低層輻合上升的氣流，並非只來自徑向外側的內流，而是徑向內側的颱風環流也在輻合後上升。此結果是否因颱風強度較弱、陸表摩擦較大或其他因素造成，需更多個案進一步分析。而較高層的西風氣流風速超過低層噴流($> 12.5 \text{ m s}^{-1}$)的標準，且風速持續加大；此風速加大之原因究竟是氣壓梯度力加速、非地轉之科氏加速、輻合加速、亦或是如Hence and Houze (2008)所提因渦管的扭轉而加速？以及，對於輻合、噴流、對流之間的交互作用與動力機制等，都有待進一步詳細探討。

針對較冷乾之西風氣流在輻合中扮演「障壁」的結論，可用更多出現滯留雨帶的個案進行模擬分析，探討此假設是否具有足夠的共通性；同時可以更多觀測資料（如衛星反演大氣溫、濕剖面等）驗證西風氣流與颱風環流之間秉性的差異。

致謝

感謝中央氣象局洪景山博士在模式執行與結果分析上的協助。本研究在國科會 NSC 97-2625-M-262-001- 及 NSC98-2625-M-233-002- 專案計畫經費支援下完成。

參考文獻

李清勝與蔡德攸，“利用 CAA 都卜勒雷達資料分析

四個侵台颱風伴隨雨帶之特徵”，大氣科學，第23期，第2號，第209-236頁，1995。

Hence, D. A., and R. A. Houze Jr. (2008), “Kinematic structure of convective-scale elements in the rainbands of Hurricanes Katrina and Rita (2005),” *J. Geophys. Res.*, 113, D15108, doi:10.1029/2007JD009429.

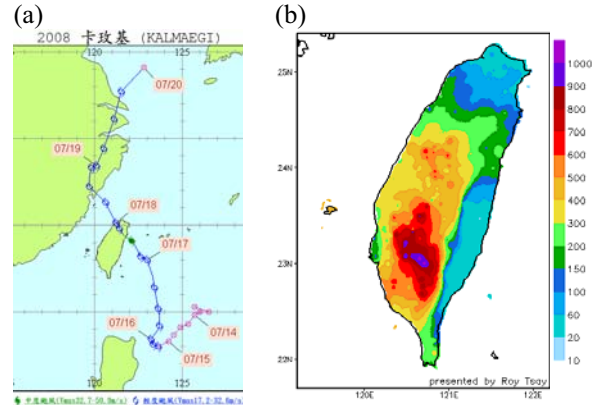


圖1 (a)卡玫基颱風最佳路徑圖、(b)2008年7月16日0000 UTC至19日1200 UTC累積雨量圖（資料來源：中央氣象局、大氣研究資料庫）。

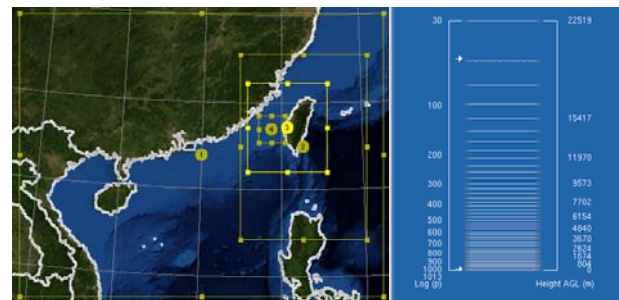


圖2 巢狀網格積分範圍及垂直分層圖。

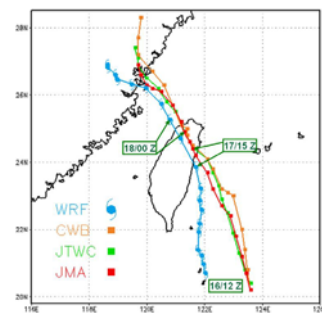


圖3 卡玫基颱風路徑圖，時間自2008年7月16日1200 UTC到18日1800 UTC，間隔為3小時，各色圖示分別代表模擬結果(D02)及各作業機構定位路徑。

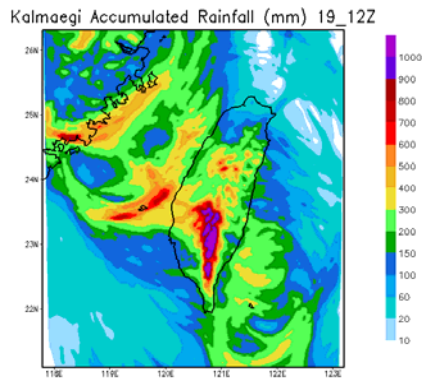


圖4 模擬累積雨量圖(D03)。

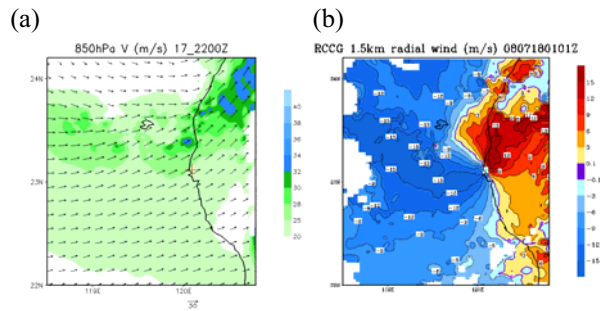


圖8 (a)模擬850 hPa水平風場圖(D03) (b) 中央氣象局七股雷達1.5 km定高面觀測徑向風(未經折錯處理)。以上色階為風速,單位為 $m s^{-1}$;時間同圖7。

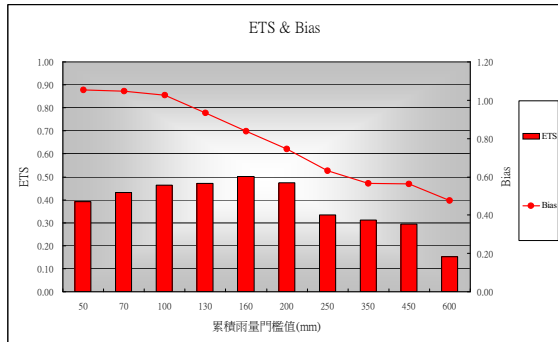


圖5 模擬降雨(D03)公正預兆得分(直方圖)及偏倚得分(折線圖)。

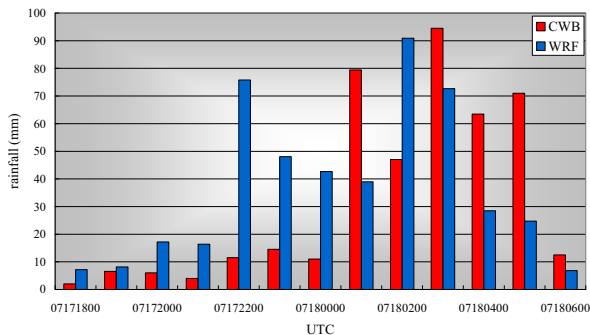


圖6 澎湖測站觀測記錄(CWB)與模擬結果(WRF, D03)時雨量直方圖。

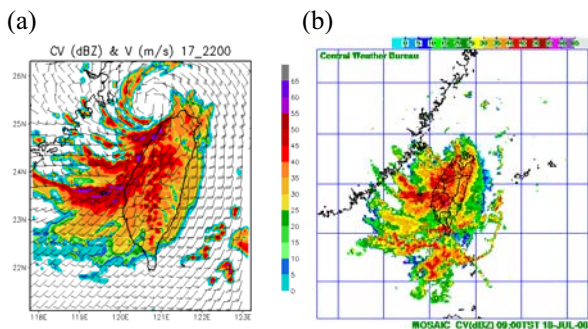


圖7 澎湖地區發生第1小時強降水時間之雷達回波圖 (a)模擬結果(D03, 2008年7月17日2200 UTC) (b)中央氣象局CV圖(18日0100 UTC)。

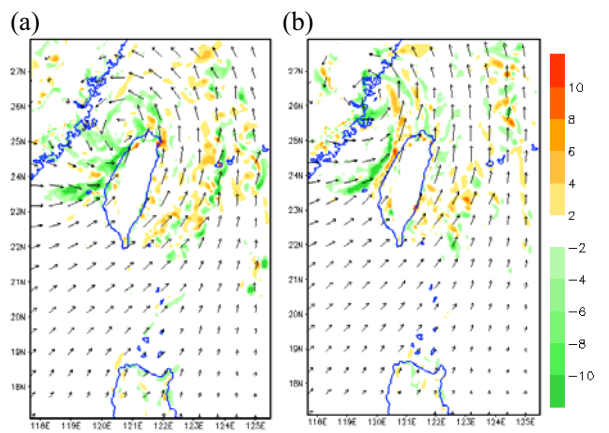


圖9 2008年7月(a)17日2200 UTC (b)18日0400 UTC 模擬(D02) 925 hPa水平風場(箭號,單位為 $m s^{-1}$)、水氣通量輻散場(色階,單位為 $10^{-3} g kg^{-1} s^{-1}$)。

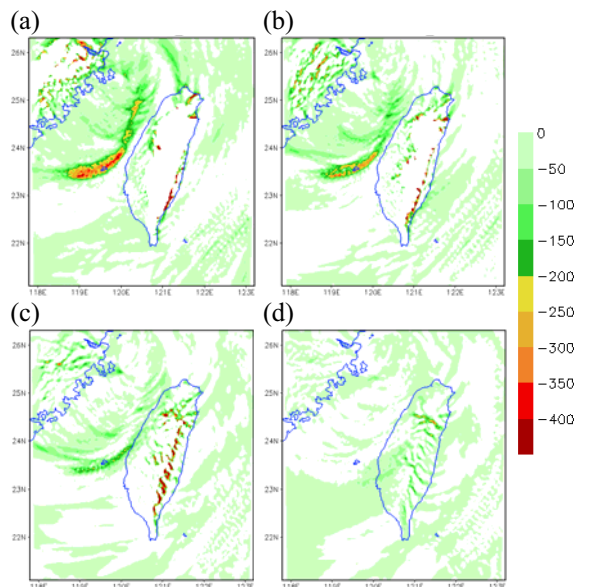


圖10 2008年7月17日2100 UTC到18日0400 UTC累積水氣通量輻散場(D03,色階,單位為 $g kg^{-1}$)，各圖分別為 (a) 925 hPa (b) 850 hPa (c) 700 hPa (d) 500 hPa等壓面。

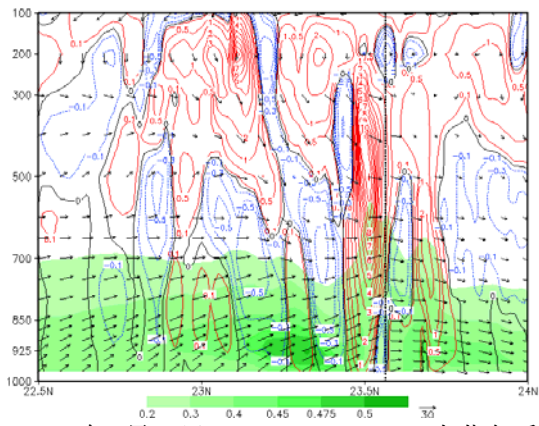
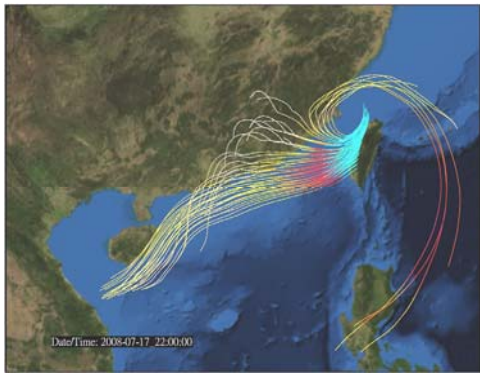


圖11 2008年7月17日2140 UTC 119.6°E南北向垂直剖面圖(D03)；箭號表水平風，單位為 $m s^{-1}$ ；等值線表垂直速度，紅色實線為正值、藍色虛線為負值、黑色為零值線，單位為 $m s^{-1}$ ；色階表緯向水氣通量，單位為 $m kg s^{-1} kg^{-1}$ 。垂直虛線為澎湖所在緯度(23.6°N)。

(a)



(b)

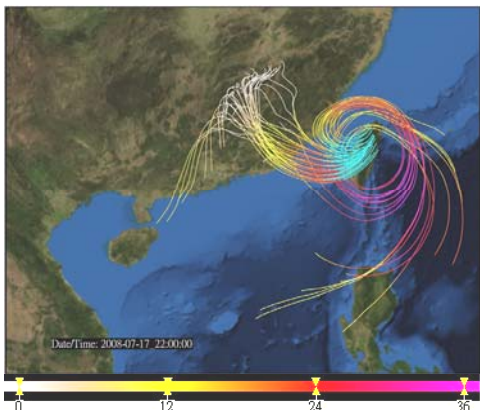


圖12 自 (a)731 m (b)3543 m 之高度，在澎湖附近地區取50個點，自2008年7月17日2200 UTC起每10分鐘積分1次，前向20次、後向250次積分之軌跡疊合圖(D01)；色階表後向軌跡風速，單位為 $m s^{-1}$ ；前向軌跡（淺藍色）無風速表示。

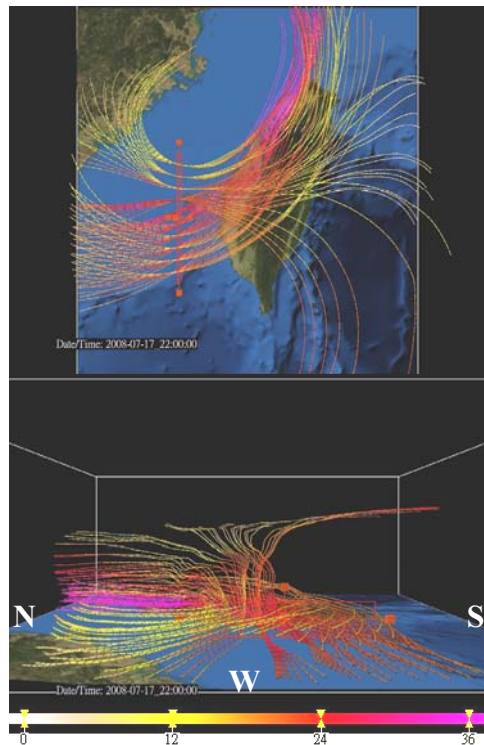


圖13 在澎湖南北方自500 m至3500 m高度之範圍，每隔500 m取10個點，自2008年7月17日2200 UTC起每10分鐘積分1次，前向50次、後向30次積分之軌跡疊合圖(D03)；色階表風速，單位為 $m s^{-1}$ 。

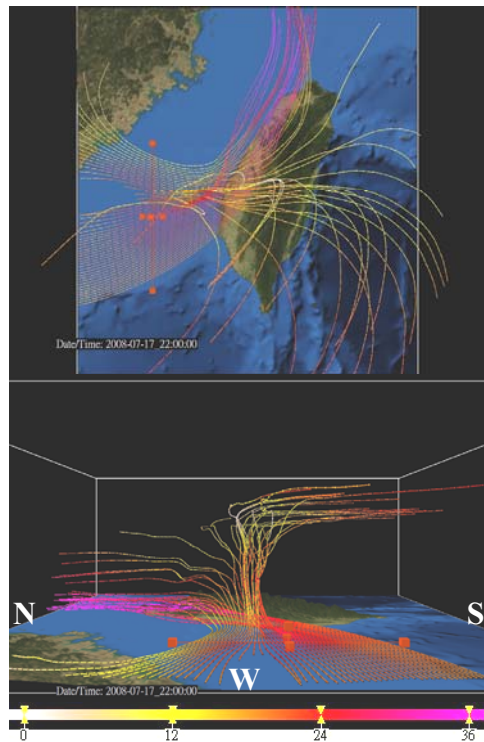


圖14 在澎湖西方自731 m之高度，自2008年7月17日2200 UTC起每10分鐘積分1次，前向50次、後向30次積分之軌跡疊合圖(D03)；色階表風速，單位為 $m s^{-1}$ 。

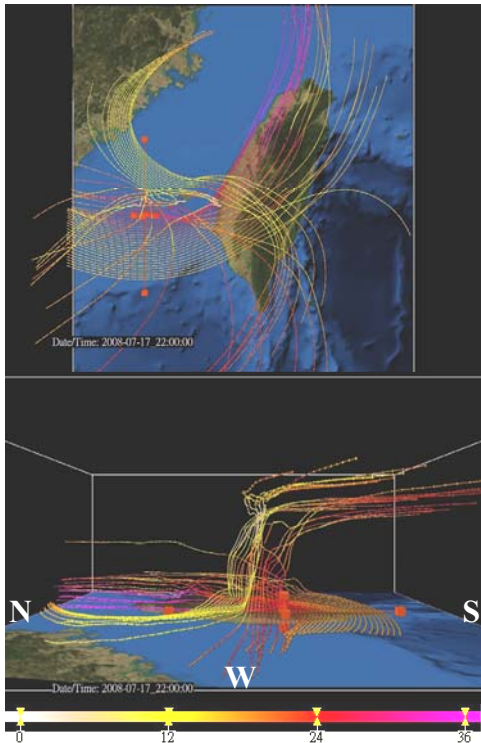


圖15 在澎湖西方自3534 m之高度，自2008年7月17日2200 UTC起每10分鐘積分1次，前向50次、後向30次積分之軌跡疊合圖(D03)；色階表風速，單位為 m s^{-1} 。

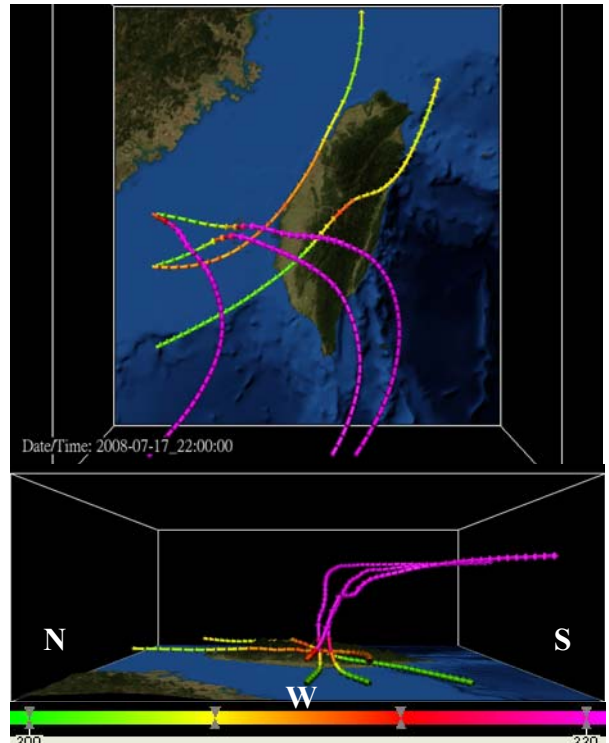


圖17 在澎湖西方731 m及3534 m高度，自2008年7月17日2200 UTC起每10分鐘積分1次，前向50次積分之軌跡圖(D03)；色階表位溫，單位為K。

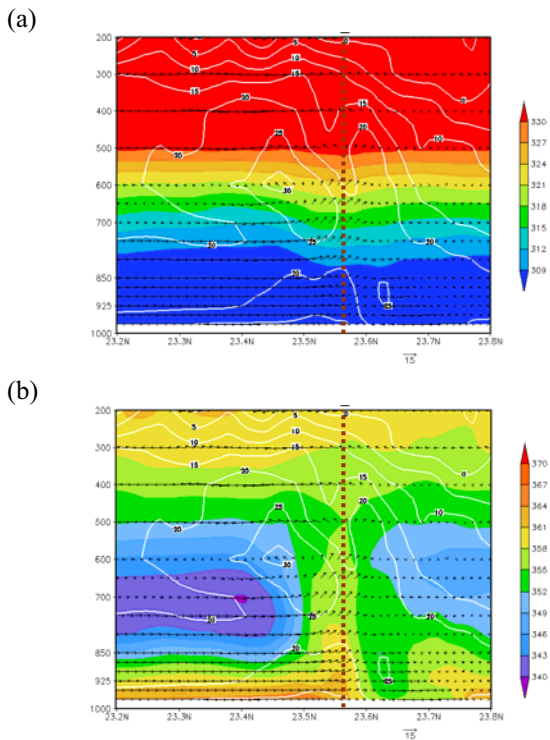


圖16 2008年7月17日2200 UTC 119.6°E南北向垂直剖面圖(D03)；箭號表經向風與垂直風合成二維風場向量，等值線表緯向速度，單位為 m s^{-1} ；(a)、(b)色階分別表位溫及相當位溫，單位為K。垂直虛線為澎湖所在緯度(23.6°N)。