

# 利用高解析度模式探討地形高度與西南氣流水氣傳送 對莫拉克(2009)颱風模擬之影響

林欽國 陳致穎 林沛練

國立中央大學 大氣物理研究所

## 摘要

2009年8月7日莫拉克颱風侵襲台灣地區，7日16Z颱風中心由台灣東部花蓮登陸，8日06Z於桃園出海，但累積降雨最大值卻發生於台灣中南部山區。根據台灣氣象局阿里山傳統測站資料顯示72小時(8月7日00Z至8月10日00Z)累積雨量高達2682.5mm，造成台灣中南部、東部多處雨量刷新歷史紀錄，引發多處土石流災害，為臺灣地區50年以來最嚴重的水災。根據天氣分析結果指出，颱風引發之環流、地形抬升作用和水氣充沛的西南氣流之交互作用是造成此劇烈降水的主要機制。再加上颱風緩慢的移動速度，長時間影響台灣地區而產生極端降雨量。本研究利用美國國家大氣研究中心(NCAR)發展的WRF(Weather Research and Forecasting)數值模式進行72小時的模擬，使用水平網格解析度18、6、2公里為此高解析度巢狀網格之設定。結果顯示模式可以掌握到台灣中南部山區觀測到的累積雨量最大值與降雨分佈。在模擬結果中，颱風強度在模擬24小時至72小時之間接近實際值，另外模擬颱風路徑亦接近觀測，得模擬累積雨量最大值和分佈接近觀測結果。本研究另外設計台灣地形作用和西南氣流水氣量兩個敏感度實驗，探討對此劇烈降水事件的影響。在降低台灣地形高度至50%以及1%之敏感度實驗中，中南部模擬累積雨量最大值明顯減少50%以及80%，證明台灣地形是影響降雨最大值與分佈的重要因素之一。另一實驗將一部分西南氣流之相對濕度降低50%，得72小時累積降雨量最大值減少約20%，台灣西南部山區的降雨強度均有減少，由此顯示西南氣流水氣的傳送亦是造成莫拉克颱風劇烈降水的重要因素之一。此外透過低水氣量區域的移動軌跡，可以了解台灣西南方海面上水氣經過台灣南部傳送至莫拉克颱風環流，進一步降低莫拉克颱風之水氣含量。

## 一、前言

2009年8月莫拉克颱風最大強度在8月5日到達中度颱風，由於颱風雲系結構不對稱，颱風眼範圍大等因素，在登陸前各界預報颱風所帶來的雨量並不大。然而颱風登陸後與伴隨的強烈西南氣流，在台灣地區降下極端雨量，中央氣象局不斷上修最大累積雨量值，台灣中南部、東部多處紛紛創下新雨量紀錄，臺灣地區50年來最嚴重的水災，引發多處土石流災害。此極端降水值得進一步探討。

莫拉克科學報告(2010)針對莫拉克進行綜觀環境天氣分析，指出數個莫拉克颱風造成極端降水的特徵，本文將引述這些分析特徵，利用數值模式所獲得高解析度的資料，進一步研究及探討莫拉克颱風侵台期間，台灣西南部及山區受到颱風環流與西南氣流的影響，造成極端降水的原因。

Tao et al. (2011)利用高解析度的WRF模式模擬研究莫拉克(2009)颱風的劇烈降雨事件，得到模式可以掌握到強降雨量與降雨位置，並且指出颱風引發之環流、地形抬升作用和水氣充沛的西南氣流之交互作用是造成此劇烈降水的主要機制。因此，本篇研究接續Tao等學者的研究，使用類似的模式設定，透過台灣地形敏感度實驗、降低部分西南氣流水汽的敏感度實驗，研究台灣地形高度與西南氣流的水氣供應對此個案劇烈降水的影響。

## 二、模式設定及實驗設計

本篇研究接續Tao et al. (2011)的研究，利用WRF V3.1版本，模擬2009年8月莫拉克颱風侵台期間在台灣地區

帶來的極端降水，初始場以及邊界場使用NCEP-FNL資料進行模擬，網格解析度為 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，時間間隔為六小時一筆。根據分析指出，莫拉克侵台期間，在8月7日00Z至8月10日00Z之72小時累積雨量高達2682.5mm，因此本研究挑選模式模擬時間為2009年8月7日00Z至2009年8月10日00Z，模擬時間共72小時。模式採用3層巢狀網格，two way nesting的方法，水平網格解析度domain 1為18公里，domain 2為6公里，domain 3為2公里為此高解析度之設定，垂直解析度為61層eta level ( $\eta$ )。網格總數domain 1為 $391 \times 322 \times 61$ ，domain 2為 $475 \times 427 \times 61$ ，domain 3為 $538 \times 439 \times 61$ 。模擬所涵蓋的地區如圖1所示。本研究所使用的物理過程參數化設定如下，積雲參數化方法使用Grell - Devenyi ensemble scheme (Grell and Devenyi, 2002)，只針對解析度為18公里的domain 1開啟，6公里的domain 2以及2公里的domain 3則因網格解析度較細，不需使用積雲參數化方法。微物理參數化方法使用Goddard microphysics (Tao et al., 1993)。邊界層參數化方法使用MYJ TKE scheme (Mellor and Yamada, 1982)。

本研究利用上述模式及物理過程設定，作為控制組 (CTRL)，比較模擬結果並分析降雨原因。此外根據 Tao et al. (2011)指出，莫拉克颱風引發之環流、地形抬升作用和水氣充沛的西南氣流之交互作用是造成此劇烈降水的主要機制。因此本研究特別針對台灣地形高度和西南氣流之水氣供應設計敏感度實驗，實驗設計如下：

地形高度敏感度實驗設計將 CTRL 之台灣地形高度降低至 50% 為 ter50 實驗；將 CTRL 之台灣地形高度降低至 1%，為 ter01 實驗 (見圖 2)。台灣最高地形高度由 3534m(CTRL)降低至 1767m(ter50)以及 35.34m(ter01)，試圖證明台灣地形是影響莫拉克颱風劇烈降雨最大值與分佈的重要因素之一。

西南氣流水氣敏感度實驗設計，吾人參考徐等人 (2005)之研究，在明顯的西南氣流傳送路徑上選取一部分區域 (如圖 3 所示)，降低此選定區域內的西南氣流之相對濕度 50% 稱為 RH 實驗。模式利用相對濕度以及溫度計算成水氣，因此在不改變溫度之下，降低相對濕度的作法亦即將選定區域之初始場及邊界場之相對濕度降低。

### 三、模擬結果與討論

圖 4 a 為不同國家預報中心所定的莫拉克颱風最佳路徑以及本模擬的最佳路徑。其中黑線為中央氣象局之最佳路徑；淡藍線為 JTWC；藍線為 JMA，而紅線則為 CTRL 模擬之路徑。模擬路徑是使用海平面最低氣壓位置、700 hPa、500hPa 的環流中心定位。比對 CTRL 與所有最佳路徑之結果，可見 CTRL 結果相似於日本氣象廳 (JMA) 藍線的最佳路徑。圖中可見颱風登陸前 (模擬 0 至 12 小時)，模擬及所有最佳路徑的颱風中心都非常接近。然而颱風登陸之後 (模擬 12 至 24)，颱風結構受到台灣地形的破壞，模擬的颱風中心位置則比最佳路徑更偏向南方。而移動速度方面整體而言模式有掌握到莫拉克颱風的緩慢移動速度。然而在 8 月 9 日 00Z 模擬的颱風比所有最佳路徑偏西，並且提前登陸福建地區，此部分將會影響雨量的最大值以及分佈。比對 CTRL 模擬之颱風強度與不同國家所定的颱風強度 (見圖 4b)，可以發現在模擬 0 至 12 小時，颱風強度約 975hPa，而觀測分析的颱風強度為 955hPa，模擬之颱風強度比觀測弱主要因為本研究中沒有使用植入渦旋，直接使用初始場及邊界場的資料進行模擬，因此颱風強度模擬容易有偏弱的情形。模擬 12 至 24 小時，實際颱風強度受地形破壞而減弱至 970hPa，接近模擬的颱風強度 (973hPa)。模擬 24 至 72 小時，模擬的颱風強度大部分接近實際強度。

CTRL 模擬 925hPa 水氣輻合場及風場 (圖 5) 顯示颱風環流以及台灣西南部皆明顯可見強水氣輻合區，可以發現從 7 日至 9 日台灣西南方海面上 (即南海區域) 常存在強水氣輻合區，這些水氣隨著西南風一部分進入台灣西南部山區，另一部則隨著低層強風速繞到台灣東側海面上，成為颱風環流的一部分。此外不僅西南方的水氣進入颱風，在

菲律賓東北方也有水氣輻合進入颱風環流。由此顯示，在 8 月 7 日至 9 日，莫拉克颱風的水氣來源不僅只有台灣西南方海面上，菲律賓東北方洋面上的水氣移入也很重要。

7、8、9 三日之模擬 72 小時累積雨量圖比對觀測結果 (見圖 6 a、b)，模擬之累積雨量最大值與觀測同樣分佈在中南部山區，並且模式同樣能夠掌握到山區的三個強降水中心分別為 3453、2961 和 2348.6mm 相對於觀測的三個強降水中心為 2682.5、2476.5mm 和 2373mm。雖然模擬的最大降雨量高估約 770mm，但是模式對於颱風路徑及強度、雷達回波分佈 (圖略) 和雨量分佈在中南部等特徵對於此極端降雨事件整體表現相當接近實際觀測情形。

吾人對台灣西南部地區取一區域 (圖 6 a 之框線)，統計模擬不同高度之平均 72 小時累積雨量圖比對觀測 (見圖 7)。可以發現在台灣西南部地區模擬與觀測的累積雨量同樣在颱風出海前並不多，強降水與觀測同樣集中在颱風出海後約 24 小時間，模擬颱風出海時間約在模擬第 24 小時，而觀測則在第 30 小時，模擬的降雨有提前 6 小時發生的情形，可能與模擬的颱風在台灣陸地上停留時間較觀測短，颱風出海時間較早有關係。此外模式有模擬到兩波強降水的發生，分別在模擬第 25 小時與模擬第 37 小時發生。

統計此區域之 72 小時平均水相粒子隨高度的分佈 (圖 8 a)，另外在區域的地形上游取一塊相同大小的特定區域代表水相粒子在海上的分佈情形 (圖 8 b)。顯示水相粒子隨高度的分佈以 500hPa 附近的融解層為界線，在低層為降雨粒子 (Qrain)、雲粒子 (Qcloud)；融解層之上為軟雹 (Qgraup)、雪粒子 (Qsnow) 和冰粒子 (Qice)。比較陸上和海上水相粒子的分佈，可見 Qrain、Qcloud 在陸地上有很明顯的增加，增加約 20 至 25 (10g/kg)，而陸地上的 Qgraup 在 500 至 400hPa 也有明顯增加約 10 (10g/kg)。由此指出在 8 月 7 日至 8 月 9 日，台灣西南部受颱風環流的影響主要為西風的情況下，當系統由海上移進陸地時，受到地形抬升的作用，激發出更多的降水粒子。亦即顯示地形抬升將水氣舉升凝結成更多的降雨粒子和雲粒子。

### 四、敏感度實驗結果與討論

#### 4-1 降低地形敏感度實驗結果與分析

模擬不同地形高度敏感度實驗與 CTRL 的颱風最佳路徑之比對 (圖 9 a)，紅線為 CTRL 模擬之路徑。綠線為降低一半地形高度的敏感度實驗 (ter50) 之路徑，紫線為移除地形高度的敏感度實驗 (ter01) 之路徑。比對不同地形高度實驗的路徑模擬結果，可見兩個地形敏感度實驗的路徑與 CTRL 皆相似，同樣由花蓮附近登陸，中心經過台灣中部地區，並且出海後往北北西方向行進。由此顯示莫拉克颱風的路徑主要受到大尺度駛流場所控制，地形對路徑的影響並不明顯。在模擬 0-24 小時，ter50 與 ter01 的路徑非常接近 CTRL 的路徑，有稍微偏向西南方的趨勢。在模擬第 24 小時大約 CTRL 颱風出海的時間，不同地形高度敏感度實驗的颱風出海時間點及位

置都非常接近。然而颱風出海後(模擬 24~42 小時), ter01 之颱風行進速度較快 提早到達福建附近的海上(第 36 小時)隨後行進速度變慢向東北方移動。而 ter50 在颱風出海(約 24 至 36 小時), 颱風行進速度也高於 CTRL。整體而言, 降低台灣地形的敏感度實驗, 模擬莫拉克颱風移動路徑差異很小, 而颱風行進速度則在出海後, ter01 及 ter50 有比較快速的移動到福建附近的海上。此行進速度比 CTRL 快速 主要因為地形降低後, 颱風受地形的破壞以及阻擋較少, 出海後的緩慢行進較不明顯。

圖9 b 為模擬CTRL與不同地形高度敏感度實驗的颱風強度之比對。整體而言, ter50及ter01的颱風強度與CTRL模擬強度相似, 差距約在1.7及2.5hPa之內。此外在大約模擬36小時之後可見ter01之颱風強度因移除台灣地形受到地形的破壞較少, 強度發展最強, ter50次之, CTRL的颱風強度明顯被破壞最多。

不同地形實驗模擬之 72 小時累積雨量, 圖 6 c, d 分別為 ter50 與 ter01 之模擬結果 比對CTRL 模擬的累積雨量(圖 6 b)。當台灣地形高度降低一半(ter50), 模擬 72 小時累積雨量最大值为 1720mm, 與 CTRL 之 3453mm 相比較, 最大雨量值大約減少 50%。然而降雨分佈同樣集中於台灣南部山區。移除台灣地形高度的實驗 模擬 72 小時累積雨量最大值則為 711mm, 與 CTRL 相比較, 最大雨量值大幅減少 80%, 並且降雨量最大值則不再位於內陸, 而是分佈於南部沿岸地區。由此證明, 台灣地形高度是影響莫拉克颱風降水最大值與分佈的重要因素之一。

比較台灣西南部區域平均上升速度(圖 10), 選取區域同樣為圖 6 a 所示的區域。顯示 CTRL 受台灣地形阻擋及抬升作用, 低層平均上升速度接近 0.6m/s。當地形降低一半(ter50), 低層平均上升速度明顯降低, 減少至 0.37m/s。當地形移除(ter01), 低層平均上升速度更明顯降低, 減少至 0.13m/s。由此顯示 CTRL 地形抬升作用造成上升速度比較 ter01 大約增強 5 倍 而 ter50 比較 ter01 則大約增強 3 倍。配合水相粒子混合比隨高度分佈, 圖 8 c, d 分別為 ter50 和 ter01 之結果, 比較 CTRL(圖 8 a)明顯顯示當地形降低, 地形抬升作用減少, 上升速度降低, 導至減少舉升凝結而成的降雨粒子, 造成降雨量的減少。此外由 ter01 的分佈相似於海上的水相粒子分佈(圖 8 b), 由此指出當降雨系統移入移除地形的地區, 水相粒子隨高度分佈的變化並不大。

#### 4-2 降低西南氣流之水氣敏感度實驗結果與分析

圖 11 為降低西南氣流水氣實驗(RH)之 925hPa 水氣含量圖, 單位為 g/kg。可以發現台灣西南方降低相對濕度 50%的區域水氣含量明顯降低, 低於 10g/kg(圖 11 a)。可以發現隨著模擬時間增加, 台灣西南方降低水氣的區域受到其西方水氣平流進入的影響, 該區域水氣量明顯快速增加。在模擬第 9 個小時後, 該區域的水氣量明顯填補, 然而此區域水氣含量仍然些微低於 CTRL 之水氣含量 此外透過降低水氣後之低水氣量區域隨時間移動的軌跡, 可以了解台灣西南方海面上水氣經過台灣南部傳送至莫拉克颱風環流, 進一步降低莫拉克颱風之水氣含量。

由西南部不同高度之平均72小時累積雨量圖(圖6 e)比對CTRL(圖6 a)可以明顯發現山區平均累積雨量都有明顯減少, 大約減少20%。平均降雨強度圖7 c顯示, 如同CTRL(圖7 a)強降水明顯集中於模擬第24小時約颱風出海後的24小時之間, 並且同樣有兩波明顯的強降水。高山區域的降雨強度均有減少約10mm/hr, 山區最強平均降雨強度由62.6 mm/hr降至約50mm/hr, 並且在模擬24至48小時降雨強度平均有明顯的減少10mm/hr。由此顯示西南氣流水氣的傳送也是影響莫拉克颱風劇烈降水的重要因素之一。

## 五、結論

透過高解析度的數值模式模擬莫拉克颱風, 結果顯示颱風路徑與強度都相當接近觀測值 並且模擬到颱風的幾個特徵: 1. 颱風移動速度慢, 長時間影響台灣。2. 能夠掌握莫拉克颱風在南台灣的極端降水以及降水分佈 並且模擬到颱風出海後南部發生的強降水。3. 台灣西南部山區受到地形抬升作用而激發出更多降雨粒子(Qrain)。此外模擬水氣輻合區顯示水氣隨著西南風一部分進入台灣西南部山區, 另一部則隨著低層強風流繞到台灣東側海面上, 成為颱風環流的一部分。然而不僅西南方的水氣進入颱風環流, 在菲律賓東北方的水氣輻合也很重要移入。

降低地形敏感度實驗結果顯示, 莫拉克颱風的路徑主要受到大尺度駛流場所控制, 地形對路徑的影響並不明顯。CTRL 模擬之 72 小時累積雨量最大值为 3453mm, 降低一半地形高度(ter50)之72小時累積雨量最大值減少至 1720mm(大約降低 50%), 降雨分佈同樣集中於台灣南部山區。移除台灣地形高度(ter01)之模擬 72 小時累積雨量最大值則減少至 711mm(大幅減少 80%), 降雨量最大值則分佈於南部沿岸地區。此外計算台灣西南部地區之平均上升速度顯示, CTRL 與 ter01 之低層平均上升速度相差約 5 倍(0.58 與 0.13); 而 ter50 與 ter01 之低層平均上升速度則相差約 3 倍(0.37 與 0.13)。顯示地形抬升作用對莫拉克颱風造成之極端降雨量非常重要。

降低西南氣流水氣實驗結果指出, 72小時累積雨量由 3453(CTRL)減少至2788(RH), 減少約20%。台灣西南部地區不同高度的平均累積雨量值皆有減少約15%。高山區域的降雨強度均有減少約10mm/hr。由以上結果顯示西南氣流水氣的傳送亦是造成莫拉克颱風劇烈降水的重要因素之一。此外透過低水氣量區域的移動軌跡, 可以了解台灣西南方海面上水氣經過台灣南部傳送至莫拉克颱風環流, 進一步降低莫拉克颱風之水氣含量。

降低西南氣流水氣敏感度實驗顯示對台灣西南部的劇烈降雨量有明顯的影響, 可以嘗試將降低水氣的區域擴大, 驗證西南氣流對台灣西南部劇烈的影響。此外由水氣傳送分析顯示不僅西南方水氣進入颱風環流, 在菲律賓東北方也有水氣輻合的移入, 可以設計降低菲律賓東北方的水氣, 測試此區域之水氣對莫拉克颱風的影響。

# 圖表說明

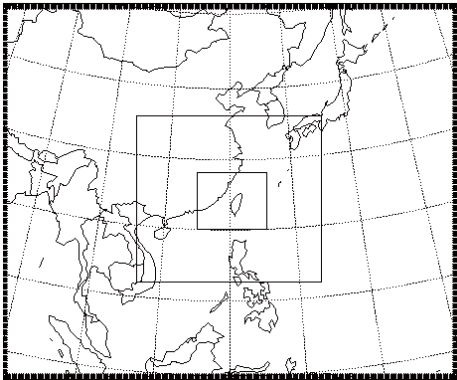


圖 1 模式三層巢狀網格所涵蓋的區域

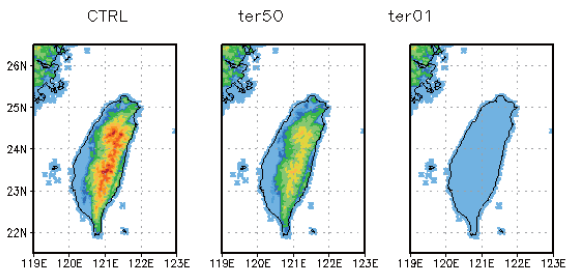


圖 2 本研究之台灣高度，左圖為 CTRL，中及右圖為敏感度實驗 ter50 及 ter01

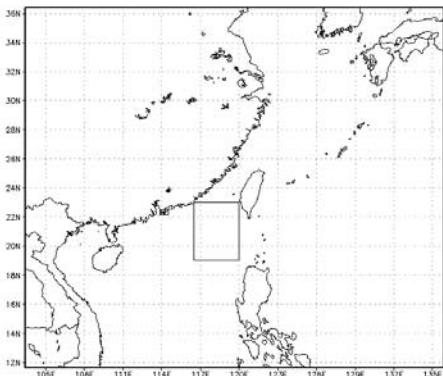


圖 3 西南氣流水汽敏感度實驗，選取降低西南方水汽的範圍如圖中台灣西南部海面所示。

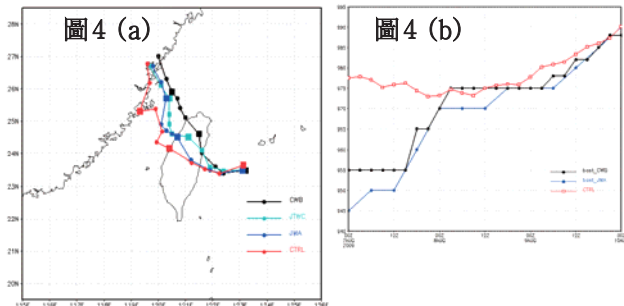


圖 4 a 為模擬之颱風路徑圖，黑線為中央氣象局之最佳路徑，淡藍線為 JTWC 最佳路徑，藍線為 JMA 之最佳路徑，紅線為 CTRL 模擬之最佳路徑。b 圖為模擬 72 小時之颱風強度，單位為 hPa。

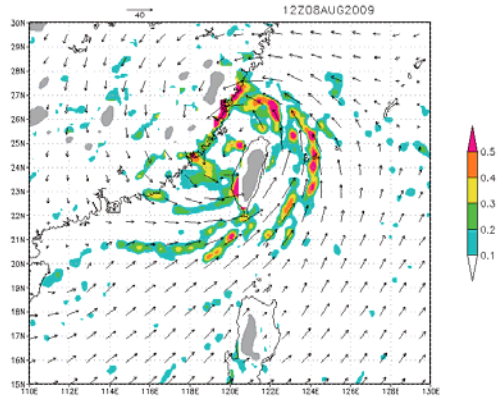


圖 5 CTRL 925hPa 之水汽輻合場及風場圖，時間為 8 月 8 日 12Z。

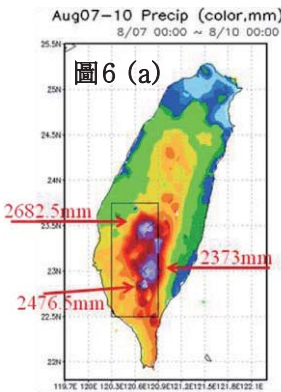
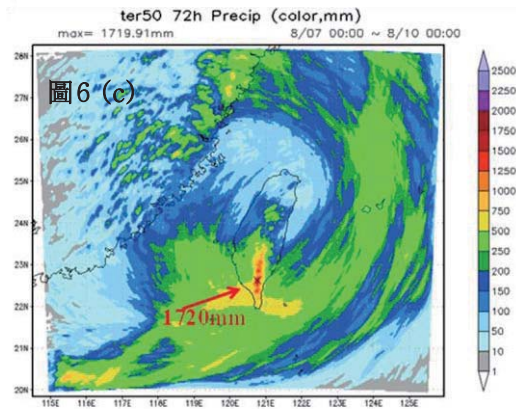
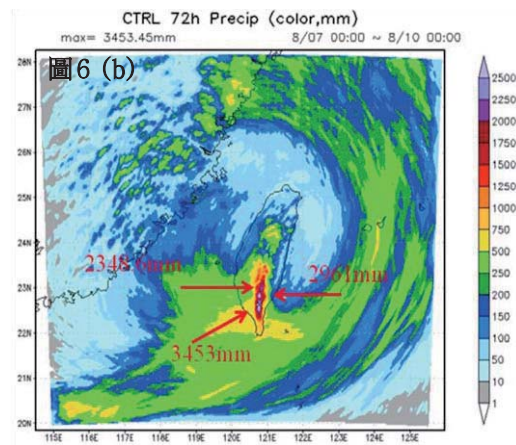


圖 6 a 為中央氣象局 72 小時累積雨量圖(8 月 7 日 00Z - 8 月 10 日 00Z)。b 為 CTRL 模擬之 72 小時累積雨量圖 c 為 ter50 d 為 ter01, d 為 RH。色階皆相同。



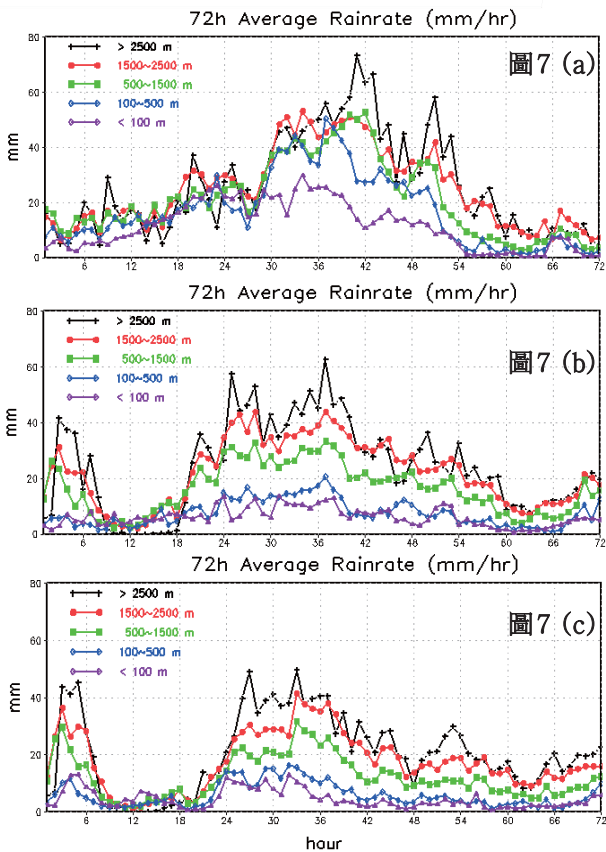
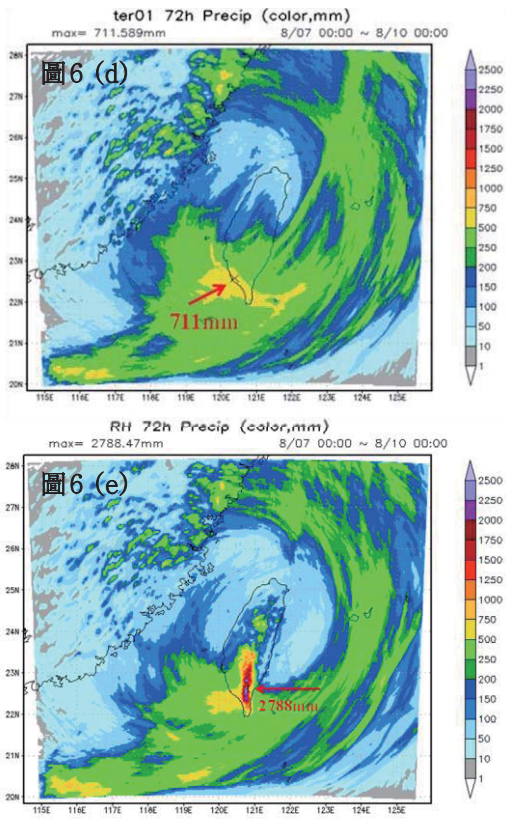


圖 7 a 為台灣西南部不同高度之 72 小時平均降雨強度圖 時間為 8 月 7 日 00Z ~ 8 月 10 日 00Z。不同線條所對應的高度，黑線為高度 > 2500m 之雨量平均，紅線為 1500~2500m，綠線為 500~1500m，藍線為 100~500，紫線為 < 100m，a 為觀測，b 為 CTRL 模擬結果，c 為 RH 實驗結果。橫軸為時間，縱軸為降雨

量，單位為 mm。

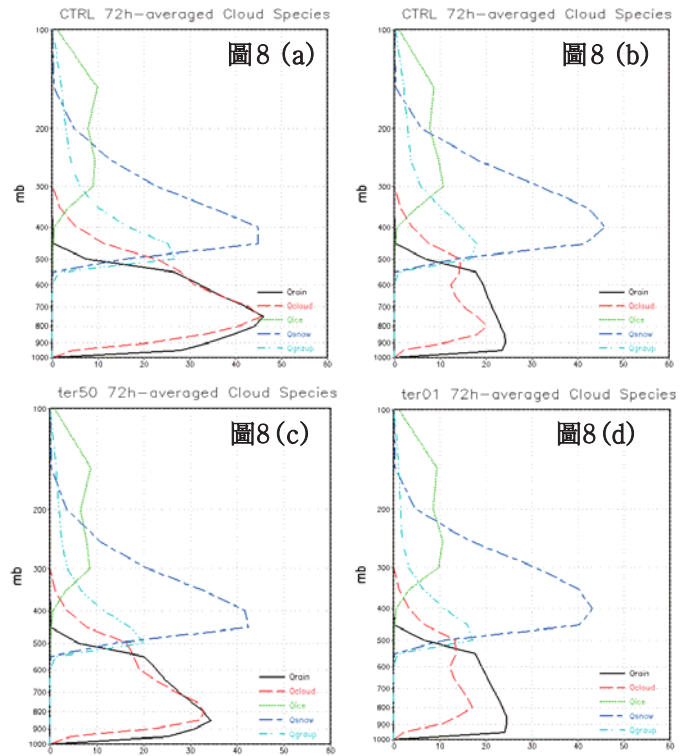


圖 8 如前 6 圖所示之區域 72 小時平均水相粒子隨高度的分佈，a 為陸地上的分佈，黑線為 Qrain，紅線為 Qcloud，綠線為 Qice，藍線為 Qsnow，淺藍線為 Qgraup。b 為其上游海上區域的分佈，c 為 ter50，d 為 ter01 之分佈。單位為  $10^{-2}$  g/kg。

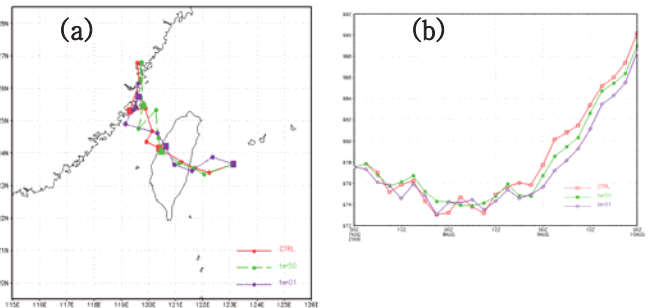


圖 9 a 為不同模擬之颱風路徑圖，間隔為 6 小時，紅線為 CTRL 模擬之路徑，綠線為 ter50 模擬之路徑，紫線為 ter01 模擬之路徑。B 圖為模擬 72 小時之颱風強度，單位為 hPa。

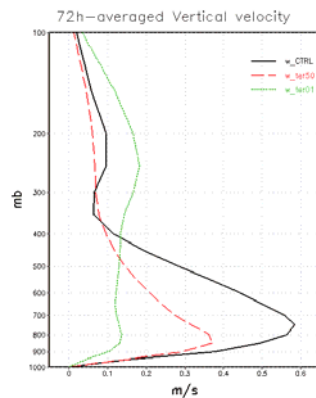


圖 10 同圖 6a 所示區域之 72 小時平均上升速度隨高度的分佈，黑線為 CTRL，紅線為 ter50，綠線為 ter01，單位為 m/s。

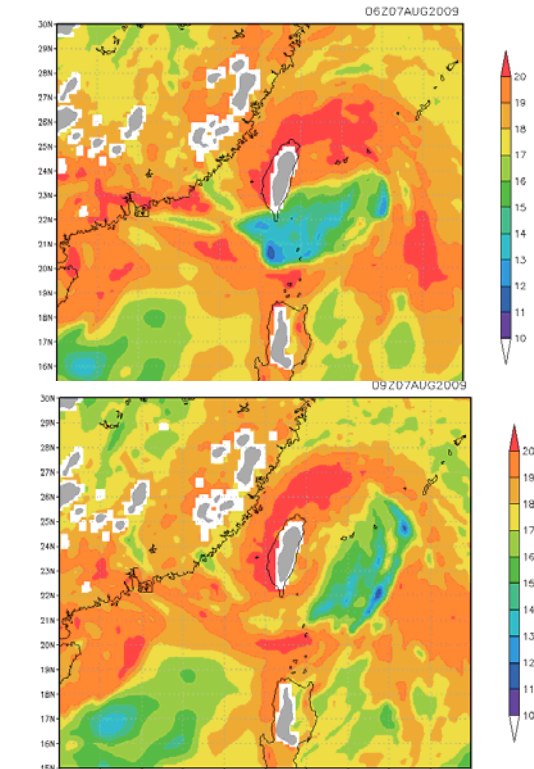
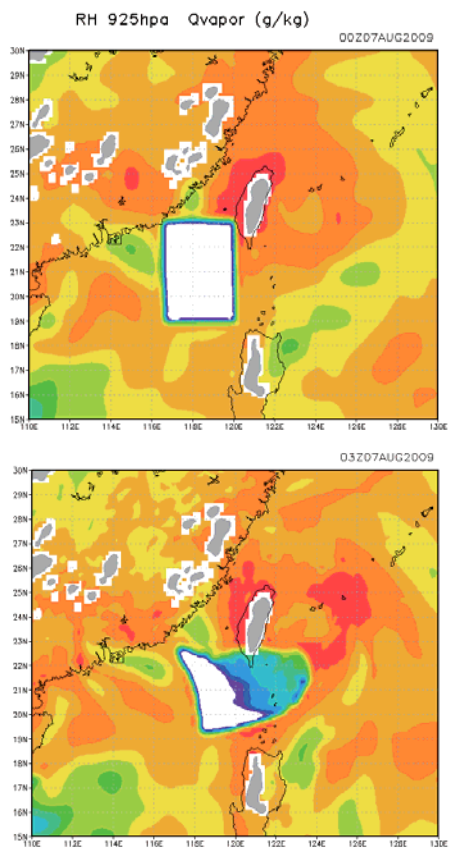


圖 11 RH 模擬之水氣含量圖，時間為 8 月 7 日 00Z ~ 8 月 7 日 09Z，時間間隔為 3 小時。水氣含量單位為 g/kg

### 參考文獻

徐文達, 2005: 伴隨敏督利颱風(2004)的強烈西南氣流引發豪大雨之個案探討。國立中央大學大氣物理研究所, 碩士論文, 98 頁。

Grell, G. A., and D. Devenyi, 2002: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, Article 1693.

Mellor, G. L., and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 851-875.

Tao, W.-K., and J. Simpson, 1993: The Goddard Cumulus Ensemble Model. Part I: Model description. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **4**, 19-54.

Tao, W.-K., J. J. Shi, P.-L. Lin, J. Chen, S. Lang, M.-Y. Chang, M.-J. Yang, C.-C. Wu, C. Peters-Lidard, C.-H. Sui, and B. J.-D. Jou, 2011: High Resolution Numerical Simulation of Typhoon Morakot. Part I: The Impact of Microphysics and PBL Parameterizations. *TAO* (revision).