中國文化大學理學院地學研究所大氣科學組

碩士論文

Master's Thesis Graduate School of Earth Science(Atmospheric Sciences Section) College of Science Chinese Culture University



指導教授:游政谷教授

Advisor: Professor Cheng-Ku Yu

研究生:廖振勝

Graduate Student: Cheng-Sheng Liao

中華民國 106 年 6 月 JUNE 2017

中國文化大學

碩士學位論文

颱風降雨氣候統計模式的發展與評估



指導教授: 苏卢汉宫(劳尔历院)所展: 黄江石院

口試日期:中華民國 106 年 7 月 3 日

摘要

本研究主要是利用全台灣各地雨量站之逐時雨量資料結合颱風 資訊與高解析度之地形資料,評估傳統氣候模式對於颱風降雨預報的 準確度,探討預報降雨誤差可能的原因,並且考量額外的氣象物理因 子於模式當中,藉此改善氣候模式的預報準確度。利用傳統模式預報 颱風降雨,模式對於掌握颱風的降雨特徵有一定的準確度,但是降水 強度的預報,對於主要降水的區域則有明顯的低估情況,而這些區域 又常常位在山區。我們統計分析地形引發的垂直速度的頻率(大於1m s⁻¹)與標準化後的預報雨量與實際雨量的誤差,在特定範圍內標準化 的誤差(-1~1)得知其垂直速度的頻率與預報誤差有正相關性,即垂直 速度的頻率愈大則誤差愈多。因此我們根據分析結果,在原始的預測 雨量上進行修正。

為了評估此方式有無改進模式,我們使用 RMSE 的方式,分別評 估改進前與改進後的模式表現。結果顯示 RMSE 對於大部分得颱風 個案都有些許改善。另外單獨評估前 30%降雨區域的累積降雨量, 改善的情況更加顯著,這些分析評估顯示,修正後的氣候統計模式對 於強降雨預報的能力有明顯的提升。

致謝

本論文得以完成,首先要感謝我的指導老師游政谷博士在這三年 細心的指導與督促。從老師身上,我不僅學習到了許多專業的知識, 更學習到老師工作時兢兢業業的態度以及嚴謹的思考,更在精神層面 上耐心的予與開導,再度感謝游老師。感謝曾鴻陽老師、吳俊傑老師 以及呂國臣老師擔任我的口試委員,經過各位老師的細心評閱與寶貴 建議,使得本論文的內容更豐富與完整。

研究所的求學過程中,在許多方面皆受到了許多人的幫忙以及照 顧。感謝系上老師們的教導,讓我學習到更多的專業知識。感謝惠雯 助教行政事情上的提醒幫忙與通融。感謝凌文學長,但是要感謝的事 情真的太多,謝謝哲佑學長、嘉倫學長、佩蓉學姊、陳瑩學姊在我有 任何問題時為我解惑,謝謝曾經待過實驗室的人給予過我的幫助。

求學過程以來經歷過了許多事情,認識非常多的人,而受到的幫助無法一一敘述,謝謝宜珳與 pusheen 在諸多事情上的關心以及無 盡的包容,使我可以抒發自己的情緒,使我的心神乾淨,也謝謝未來 要讓我養的貓,是你使得我可以朝未來邁進與努力。謝謝大學期間認 識的朋友,謝謝當時大家一起做過的許多事情,謝謝太多人在我最需 要幫忙的時候伸手給我幫助,要謝謝的人真的無法一一提起,非常抱 歉。

最後謝謝我的家人,沒有你們也不會有今天的我,有了你們的理 解與支持,使我沒有後顧之憂的將學業完成。最後再次感謝所有幫助 過我的貴人們,因為有你們的幫忙才有這個成果,最後的最後感謝接 觸過的人,有你們才有現在的我,本碩文研究絕非以我一人之力所能 完成,在此將這份成果呈現給大家。

Ш

目錄

摘要 I
致謝
目錄 Ⅲ
圖表說V
第一章 前言1
(一)文獻回顧1
(二)研究動機與目的
第二章 資料及研究方法5
(一)資料
1.資料來源
2.數值地形模型資料
(二)研究方法
1.颱風降雨資料庫
第三章 傳統氣候降水模式8
(一)模式介绍
(二)模式的表現及評估8
第四章 氯候模式之改進及評估12
(一)地形效應與預報誤差的關係12
(二)氟候模式之評估15
(三)氣候模式之預報17
第五章 結論與未來展望19

(-	-)結論	19
(二)未來展望	20
參考	文獻	21
表		23
圖		27



圖表說

- 表1 颱風基本資訊,颱風個案之起訖時間、歷時,強度、近中心最大風速, 最大風速半徑範圍。
- 表2 不同颱風個案之模式表現評估,模式預測雨量的 RMSE、颱風的平均 降雨量、颱風的平均降雨強度,及標準化後的 RMSE。
- 圖 1.1 地形降水機制示意圖。(a)種饋機制(Seeder-feeder mechanism);
 (b)地形斜坡強迫舉升凝結機制 Upslope forcing); (c)地形斜坡激發 機制(Upslope trigger -ing); (d)地形上游減速激發機制(Upstream triggering); (e)熱力激發機制(Thermal triggering); (f)背風面輻合激 發機制(Lee-side triggering); (g)背風 面重力波加強機制(Lee-side enhancement by gravity)(圖摘取自 Houze 1993)
- 圖 1.2 颱風降水分布圖。(a)淡水河流域;(b)高屏溪流域。等值線為颱風 在該位置時該流域的降雨強度(單位為mm h⁻¹等值線為3mm h⁻¹,
- 色階代表降雨強度≥ 6 mm h⁻¹)。(圖摘取自 Lee et al. 2006) 圖 1.3 2002 年侵襲台灣的 3 個颱風路徑圖。(每點間距 3 個小時,數字是 颱風當時的日期時間(UTC),右側的(O)為實際累積降雨量,(M) 為模式預測累積降雨量,DSH 代表淡水河流域,KPS 代表高屏溪 流域)(圖摘取自 Lee et al. 2006)
- 圖 2.1 台灣地形及測站分布圖。色階為地形高度,實心黑點是中央氣象局 局屬測站及自動觀測站,共 399 個測站。
- 圖 2.2 1997 ~ 2012 年 62 個颱風之颱風路徑圖。黑實線範圍為本研究之 主要研究區域。
- 圖 2.3 1997 ~ 2012 年 62 個颱風經過圖(2.2)黑實線區域之颱風頻率分布 圖。
- 圖 2.4 1997 年安珀颱風期間阿里山測站的降水分布圖。色階為安珀颱風 經過這個位置時,阿里山測站的降雨強度。實心三角形為阿里山

测站所在的位置。

圖 2.5 1997 ~ 2012 年間合計 62 個颱風之阿里山測站的降水分布圖。色 階為當颱風經過這個位置時,統計的阿里山測站之平均降雨強度。 實心三角形為阿里山測站的位置。颱風沒經過的位置色階為白 色。

- 圖 3.1 海棠颱風(2005)之(a)颱風路徑圖、(b)模式預測雨量分布圖、(c) 實際觀測雨量分布圖、(d)模式預測雨量與實際觀測之差異分布 圖。(b)、(c)灰階為地形海拔高度[m],色階為總降雨量[mm],(d) 灰階為地形海拔高度[m],色階為模式降雨與實際降雨的誤差。
- 圖 3.2 同圖 3.1,但為薔蜜颱風(2008)。
- 圖 3.3 同圖 3.1,但為辛樂克颱風(2008)。
- 圖 3.4 同圖 3.1,但為莫拉克颱風(2009)。
- 圖 3.5 同圖 3.1,但為柯吉拉颱風(2003)。
- 圖 3.6 同圖 3.1,但為南卡颱風(2003)。
- 圖 4.1 地形引發的垂直速度的水平分布圖。色階表示地形引發的垂直速度 的數值(單位為 m/s,間距標示於圖上方),灰階為地形海拔高度 (單位為公尺,間距標示於圖右側)。
- 圖 4.2 切向風距離颱風中心之風速變化圖。X 軸為離颱風中心的距離(單位為公里), Y 軸為風速(單位為 m/s)。
- 圖 4.3 海棠颱風(2005)侵襲期間地形引發的垂直速度的頻率的水平分布。 色階表示地形引發的垂直速度的數值(單位為 m/s,間距標示於圖

上方),灰階為地形海拔高度(單位為公尺,間距標示於圖右側)。 圖 4.4 海棠颱風(2005)侵襲期間的地形引發的垂直速度的頻率與預報降 水誤差之點散圖。X 軸為地形引發的垂直速度的頻率,Y 軸為標 準化後的預報降水誤差。黑實線是以最小平方法求得之線性迴歸 線,相關係數標示於圖上方。 圖 4.5 同圖 4.3,但為薔蜜颱風(2008)。

圖 4.6 同圖 4.4,但為薔蜜颱風(2008)。

- 圖 4.7 同圖 4.3,但為辛樂克颱風(2008)。
- 圖 4.8 同圖 4.4,但為辛樂克颱風(2008)。
- 圖 4.9 同圖 4.3,但為莫拉克颱風(2009)。
- 圖 4.10 同圖 4.4,但為莫拉克颱風(2009)。
- 圖 4.11 同圖 4.3,但為柯吉拉颱風(2003)。
- 圖 4.12 同圖 4.4,但為柯吉拉颱風(2003)。
- 圖 4.13 同圖 4.3,但為南卡颱風(2003)。
- 圖 4.14 同圖 4.4,但為南卡颱風(2003)。
- 圖 4.15 1997~2012 年 43 個颱風,地形引發的垂直速度的頻率與預報降 水誤差之點散圖。X 軸為地形引發的垂直速度的頻率,Y 軸為標 準化後的預報降水誤差。黑實線是以最小平方法求得之線性迴歸 線,相關係數標示於圖上方。
- 圖 4.16 同圖 4.11,但去除頻率等於 0 的點。
- 圖 4.17 同圖(4.11),但同時去除頻率等於 0 以及標準化後的誤差在-1~1 之間的點。
- 圖 4.18 海棠颱風(2005),改進後的模式預報降雨之水平分布圖。色階表 示總降雨量(單位為毫米,間距標示於圖上方),灰階為地形海拔 高度(單位為公尺,間距標示於圖右側)。
- 圖 4.19 海棠颱風(2005),改進後的模式預報雨量與實際降雨之差異分 布圖。色階表示誤差雨量(單位為毫米,間距標示於圖上方),灰 階為地形海拔高度(單位為公尺,間距標示於圖右側)。
- 圖 4.20 同圖 4.14,但為薔蜜颱風(2008)。
- 圖 4.21 同圖 4.15,但為薔蜜颱風(2008)。
- 圖 4.22 同圖(4.14),但為辛樂克颱風(2008)。

- 圖 4.23 同圖(4.15),但為辛樂克颱風(2008)。
- 圖 4.24 同圖(4.14),但為莫拉克颱風(2009)。
- 圖 4.25 同圖 4.15,但為莫拉克颱風(2009)。
- 圖 4.26 43 個颱風個案對所有測站之修正後模式的 RMSE 減去傳統氣候模 式的 RMSE 長條圖。X 軸為颱風個案, Y 軸分別為 RMSE 數值(標 示在圖的左側), RMSE 變化的比例(標示在圖的右側)。
- 圖 4.27 43 個颱風個案對前 30%的降水區之修正後模式的 RMSE 減去傳 統氣候模式的 RMSE 長條圖。X 軸為颱風個案,Y 軸分別為 RMSE 數值(標示在圖的左側), RMSE 變化的比例(標示在圖的右側)。
- 圖 4.28 蘇力颱風之(a)颱風路徑圖、(b)模式預測之雨量分布圖、(c)實際 觀測之雨量分布圖、(d)修正後模式之預測雨量分布圖。(b)、(c)、

(d)灰階為地形海拔高度[m],色階為總降雨量[mm]。

圖 4.29 同圖(4.24),但為麥德姆颱風。



第一章 前言

颱風在自然界中是一極具破壞力的天氣系統,台灣位於西北太平 洋颱風的主要侵襲路徑上,每年平均受3~4個颱風影響,因此,對 台灣而言,颱風是相當重要的災變天氣之一。由於颱風所造成的災害 損失都非常嚴重,侵台颱風所導致的災害主要肇因於其所伴隨之豪雨, 局部性之豪雨常造成該區域之山崩、土石流,較大地區之豪雨則可能 造成河水暴漲以及淹水。故發展更有效的客觀方法進行颱風降雨預報, 是許多學者努力的目標。

目前的颱風降雨預報技術,大致可分為數值模式預報法與氣候統 計法兩大類,數值模式預報法雖然在完整物理架構下,數值模式很可 能可以模擬出合理的颱風降雨分布,但由於諸多因素的影響,如使用 的數值方法需很穩定,儘量減少誤差增長速度、物理參數方法不盡完 美,以及複雜地形的處理等,在實際預報作業時,卻存在著許多不確 定性。而氣候統計法則建立在歷史颱風資料的統計應用,考慮的是歷 史案例的重現性,具有統計預報穩定性的優點。建立颱風期間各測站 雨量的氣候統計分布,適用於一般典型平均狀態的颱風,但對非典型 颱風如颱風與大環境之氣流或其他颱風之共伴、颱風結構不對稱等, 會有低估降雨量的可能。另當颱風路徑預報有偏差時,亦會導致雨量 分布將明顯的偏離實際觀測。本研究則著手於改進颱風降水氣候模式, 並加強對侵台颱風之研究,考量額外氣象物理因子,進一步發展颱風 降雨氣候模式,增進此模式對於颱風降雨的預報準確度。

(一)文獻回顧

台灣是一個長 394 公里,寬 140 公里的小島,但台灣的地勢高聳 複雜,中央山脈是台灣最長最大之山脈,南北縱貫全島長 330 公里, 平均海拔高度超過 2000 公尺,當颱風接近台灣時其結構與動力往往 會有巨大的變化(Wang 1992, Chang et al., 1993, Lin et al., 2001),

另一方面,颱風環流也會使溫暖潮濕的空氣隨著地形抬升,在迎風面造成連續不斷的暴雨,導致嚴重的淹水、山崩以及土石流。從過去的一些研究顯示梅雨與颱風季節所發生的強風與豪雨常常與地形效應 有關(Lin 1993; 林與郭 1997; Li and Chen 1998)。其中又以颱風 所造成的災害最為嚴重。數值模擬研究亦顯示侵台颱風所伴隨之劇烈 降水與地形效應密切相關(Wu and Kuo 1999)。

地形與綜觀天氣系統的交互作用,是引發劇烈的降水原因之一。 早期 Houze(1993)將地形降水機制(如圖 1.1 所示)簡略分為(a)種饋機 制(Seeder-feeder mechanism);(b)地形斜坡強迫舉升凝結機制 (Upslope forcing);(c)地形斜坡激發機制(Upslope triggering);(d)地 形上游減速激發機制(Upstream triggering);(e)熱力激發機制 (Thermal triggering);(f)背風面輻合激發機制(Lee-side triggering); (g)背風面重力波加強機制(Lee-side enhancement by gravity)。上述 七種地形降水機制說明透過不同的環境因素會造成動力上或熱力上 的強迫,產生不同型態的地形降水機制,也會導致主要降水區域的變 化,但我們對發生於颱風環境下之地形降水的知識卻相當有限(Yu and Cheng 2008;Smith et al. 2009)。鄭(2006)透過雷達觀測檢視象 神颱風環境下的北台灣山區之降水分布及強度,除了呈現山區降水的 時空變化與地形及地形上游氣流強度密切相關,也顯示山區降水之區 域奧地形引發的垂直速度局部最大值區域有關聯性,指出地形斜坡強 迫舉升凝結機制對於山區降水加強有貢獻。

Lee et al.(2006)利用 1989~2001 年台灣地區各地氣象站及自動雨量站,共計 371 個雨量站的逐時雨量資料,建立颱風降雨氣候統計模式,並利用此模式進行預報。(圖 1.2)是淡水河及高屏溪流域的颱風降水強度分布圖,當颱風中心在不同位置時,淡水河及高屏溪流域當時的降水強度,配合颱風路徑的預報則可以得到颱風期間淡水河

及高屏溪流域的累積雨量。(圖 1.3)是氣候模式對 2002 年的雷馬遜颱 風、娜克莉颱風以及辛樂克颱風的降雨預報,此氣候模式的估計結果 顯示其低估雷馬遜颱風的雨量,高估娜克莉颱風的雨量,辛樂克颱風 的預報雨量與實際雨量則較為一致。另外,透過淡水河及高屏溪流域 之降水預估結果進行氣候模式之校驗評估,評估結果顯示氣候模式對 颱風期間總累積雨量之預估已具相當能力,但對較短時段(如 3 小時 累積雨量)則預估的能力顯著下降。

(二)研究動機與目的

由於颱風降雨氣候模式所需要的電腦需求比起數值模式是比較 低的,所以可以在颱風侵襲之前更快速地評估潛在強降水區域,有助 於防災單位以及民眾進行防災措施。Lee et al.(2006)指出氣候模式的 24 小時雨量預測值與觀測值的相關係數高達 0.5~0.6。這樣的表現 其實與台灣的地形有關,由於侵台颱風的結構容易受到中央山脈的影 響,同時迎風面的地形斜坡強迫舉升機制也會增加降雨量。因此只要 颱風的路徑預報可以準確的定出颱風的位置,相對於中央山脈的降雨 分布來說,都擁有頗高的氣候預測相關性。對於傳統的颱風降雨氣候 統計模式而言,原則上只需要知道颱風中心的路徑資訊及可預測全台 的降雨強度與分布。然而,此類模式並沒有包含任何的物理機制或參 數,而且在山區其預報降雨強度常常是低估的。

本研究將運用氣候模式之方法,利用地面雨量站所蒐集之資料, 建立颱風降雨氣候資料庫,並且客觀評估此模式對於颱風的降水預測 值,試圖了解造成模式預測雨量與實際雨量的誤差可能的原因,並嘗 試於氣候模式中加入其他的氣象因子對於估計降水的影響,期望能改 善氣候模式的預報準確度。

本文第二章說明研究所使用的資料來源及分析方法。第三章介紹 傳統氣候模式並且評估傳統氣候模式預報的表現。第四章結合高解析

度的地形資料、颱風中心定位資料及地面逐時資料初步分析地形引發 的垂直速度的頻率與降雨誤差之間的關係,利用此關係修正傳統的降 水氣候模式,並評估傳統氣候模式與改進後的模式,最後將研究結果 及未來展望整理於第五章。



第二章 資料及研究方法

(一)資料

1.資料來源

本研究所使用之資料包含颱風路徑資料、地面逐時雨量資料、颱 風最強風速、颱風最大風速半徑以及數值地形模型資料,其資料來源 及個別介紹如下:

(1)中央氣象局:地面測站逐時雨量資料,包括局屬地面觀測站及自動觀測站。

(2)美國聯合颱風警報中心(Joint Typhoon Warming Center,簡 稱為 JTWC):提供最佳化颱風基本資料,主要參數使用颱風中心定 位、颱風近中心最大風速,以及最大風速半徑。

(3)中央大學太空及遙測中心: 數值地形模型資料(Digital Terrain Model 簡稱 DTM)。

圖書館

S

2. 數值地形模型資料

台灣地區數值地形模型資料(Digital Terrain Model,隨後簡稱 DTM)為行政院農委會補助計畫「台灣地區數值地形模型資料」,由林 務局農林航空測量所執行,製作完成之台灣地區數值地形模型資料, 轉存中央大學太空及遙測研究中心並負責保管。此DTM之平面座標 系統採用二度分帶橫麥卡脫投影(Two Degree Zone Transverse Mercator Projection 簡稱二度 TM 座標),水平解析度為 40 m x 40 m, 地形高度單位為公尺,原始資料以 ASCII 碼逐點儲存三維座標。由於 地形資料為 ASCII 碼儲存,資料儲存空間龐大,而為了節省資料儲存 空間及增加資料讀取速度,所以將原始資料轉為 BINARY 格式。為 了提供降水診斷模式所需之地形高度資料,我們將此數值地形模型資 料輸出一組水平解析度為 1 km x 1 km 的地形資料。

本研究為配合此地形資料之座標系統,透過中央研究院計算中心 GIS 小組所開發的座標轉換計算程式,將所有經緯度資料(即海岸線 資料與測站位置)統一轉換為 TWD67(Taiwan Datum 1967)大地基準 之二度 TM 分帶座標(即以虎子山為三角測量基準)。下列為 TWD67 的相關介紹:

- (1)參考橢球體採用 1967 年新國際地球原子:長半徑: a =6378160 公尺,短半徑: b =6356774.7192 公尺,扁率(oblateness): f =(a-b)/a=1/298.25。
- (2)大地基準點(geodetic datum):以南投埔里之虎子山起算,經度λ為 120° 58' 25.975",緯度 φ為 23° 58' 32.340",對頭拒山(頭拒山又名頭櫃山,位於台中市新社區內)之方位角 α=323° 57'
 23.135"。
- (3)高度基準面:以台灣本島以基隆平均海水面起算,澎湖以馬公平 均海水面起算。

(4)地圖投影:有關地籍測量及大比例尺測圖所應用之座標系統,係 採用橫麥卡托投影經差二度分帶,台灣本島之中央子午線(central meridian)為121°,座標原點為中央子午線與與赤道(equator)交點, 且橫座標西移250,000公尺,中央子午線之尺度比率為0.9999。

1.颱風降雨資料庫

挑選建站時間早、資料含量較完整,共計 399 個地面觀測站及自動雨量站,測站分布如圖(2.1)。將台灣附近依經緯度分為每0.1°×0.1°, 統計 1997~2012 年間共計 62 個颱風經過台灣附近時各個雨量站的 逐時雨量資料,颱風路徑及統計範圍如圖(2.2),颱風經過台灣附近時 之網格點資料的頻率分布如圖(2.3),頻率最高為7次,大部分都介於 1~3次。統計測站逐時雨量資料的步驟,以阿里山測站為例子,可 分為下列3個步驟:

(1)當颱風(1997年安珀颱風為例)經過台灣附近時,將阿里山測站的 逐時雨量紀錄在颱風中心經過的模式網格中,得到颱風中心在不同位 置時,阿里山測站所觀測到的平均降雨強度,如圖(2.4)。

(2)利用 1997~2012 年 62 個颱風個案,重複步驟(1)的做法,即可得 到阿里山測站的颱風降雨分布(圖 2.5)。

(3)利用雙線性內插法補足沒有資料的模式網格,填滿沒有降雨強度 分布的模式網格(圖 2.6)。

在預報颱風期間台灣的之降雨分布,只要知道颱風的路徑位置, 累加颱風路徑對應到的每個模式網格內的雨量資料,即可得到一個該 測站預測的總降雨量,當每個測站都有預測的總雨量,可以得到颱風 期間全台灣的降雨分布,可以由模式預測之降雨分布得知哪些地區是 潛勢強降雨區,使得防災應對更容易進行。



第三章 傳統氣候降水模式

(一)模式介紹

本研究所使用的颱風降水氣候模式是參照 Lee et al.(2006)的氣 候模式設計及概念。此氣候模式只要知道颱風中心的位置,就可以預 測全台灣的降雨分布。本研究統計 1997~2012 年 62 個颱風個案, 399 個測站之逐時雨量資料,整理出各個測站之颱風降雨資料庫,颱 風的基本資訊如(表 1)所示。未來在預報颱風期間的全台降雨分布只 需輸入逐時的颱風中心位置即可估計降雨分布及強度。

(二)模式的表現及評估

為了瞭解此模式在降雨預報的表現,將1997~2012年62個颱 風進行模式預測雨量與實際觀測進行比較,試圖釐清模式預測誤差在 台灣的分布情形。另外,透過計算實際觀測雨量及模式預測雨量的均 方根誤差(root-mean-square error, RMSE[單位為 mm], Barstad and Smith 2005)將模式預測值與實際觀測值之間的誤差量化,公式為:

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left(q_i^{obs} - q_i^{model}\right)^2\right]}$$
(3.1)

其中q_i^{obs}為實際觀測值(單位為mm),q_i^{model}為模式估計值(單位為mm)。針對單一降水事件透過 RMSE 即可初步評估模式對於該降水 事件的表現。當要比較多個降水事件的降水強度時,因為個案時間有 差異,個案的實際觀測值及模式估計值會與個案時間成正比,(3.1) 式估計的 RMSE 也會倍增,因此若要比較多個降水事件之間的個案 誤差情況,可將 RMSE 除上預測雨量平均值作標準化(Vignal et al.2000),即

$$RMSE_{nor} = \sqrt{\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (q_{i}^{obs} - q_{i}^{model})^{2}\right]} / (\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} q_{i}^{obs})$$
(3.2)

RMSE_{nor}為一無因次參數,透過(3.2)式估計的 RMSE_{nor} 便能同時對 多個降水事件作較合理個案誤差比較。

RMSEnor愈小表示模式預測與實際觀測值之間的誤差愈小;模式

的預測比較接近實際觀測。挑選統計資料中4個颱風個案,海棠 (2005)、薔蜜(2008)、辛樂克(2008)以及莫拉克(2009),這4個颱風 個案皆是 RMSE_{nor}較接近0而且平均降雨強度也比較強,藉此了解 平均降雨強度強且模式預報雨量與實際觀測雨量較為接近的颱風個 案。

海棠(2005),接近台灣時在花蓮外海打轉,在宜蘭東澳附近登陸 後,從苗栗後龍附近進入台灣海峽,繼續向西北前進(圖 3.1a)。模式 預測在中央山脈南段有一降雨最大值的區域約 1000 毫米,鄰近最大 值區域之預測雨量約 500~700 毫米,中央山脈北段存在預測雨量約 400 毫米的區域(圖 3.1b),實際觀測海棠颱風之降雨分布,在中央山 脈北段有 2 處區域降雨最大值約 700 毫米,中央山脈南段降雨最大 值的的區域約 1200 毫米(圖 3.1c)。中央山脈南段之低估情形位於降 雨最大值區,其低估的雨量大約為-400~-300 毫米,中央山脈北段 也有一低估-400~-300的區域,而模式高估雨量的位置多位於平地, 但是高估的降雨量較少,而主要的差異多位於地形上(圖 3.1d)。

 蔷蜜(2008),接近台灣時於宜蘭南澳附近登陸,從桃園附近出海 之後轉向北北東移動遠離台灣(圖 3.2a)。模式預測中央山脈北段與中 段共2處區域降雨最大值,約為400~500毫米(圖 3.2b),實際觀測 蔷蜜颱風之降雨分布,在中央山脈北段及中段有2處區域降雨最大值, 約600~800毫米(圖 3.2c),在上述兩個位置有比較明顯的低估情形, 低估的量值大約為-400~-300毫米,整體而言模式雨量低估的區域 則遠大於雨量高估的區域,而雨量低估較明顯的區域多半位於地形 上。

辛樂克(2008),接近台灣東部海面後,從宜蘭縣蘭陽溪附近登陸, 向南偏移至蘇澳附近,之後掠過東北角進入北部海面,出海後緩慢移 動,颱風朝東北前進遠離台灣(圖 3.3a)。模式預測在中央山脈的北段

有 700~900 的降雨量,中央山脈中段有約 1000 毫米的降雨量,而 雨量多集中在山區(圖 3.3b),實際觀測辛樂克颱風之降雨分布,強降 雨地區的多位在山區,苗栗山區觀測到 1200~1300 毫米的雨量,中 央山脈北段觀測到約 800~900,中央山脈中南段有 1200~1300 毫 米的雨量(圖 3.3c),模式低估雨量的比較明顯的區域位在中央山脈北 段與中段,低估的雨量值大約為-400~-300,而且多位在相對降雨最 大值的區域,模式低估雨量的區域也大於雨量高估的區域(圖 3.3d)。

莫拉克(2009),進入台灣東部近海時可能受地形影響,移動速度 略為減慢並轉向西北,從花蓮登陸由桃園附近出海後朝西北方前進 (圖 3.4a)。模式預測中央山脈南段山區有大量的降雨,預測雨量的範 圍約 1300 毫米以上,且除了山區之外西南部地勢較低的地區也有大 量的降雨量,約 400~600 毫米(圖 3.4b),實際觀測莫拉克颱風之降 雨分布,強降雨的位置與模式預測的位置吻合,但是中央山脈南段的 降雨多為 1500 毫米以上,平地的雨量大約為 700~900 毫米,相對 而言北部的雨量較少(圖 3.4c),模式低估雨量的情況在台灣南部十分 明顯,約為-700~-300 毫米,山區雨量低估的情況最為明顯,而高 估的情況則多在台灣北部(圖 3.4d)。

為了更進一步的了解氣候模式預報颱風雨量的情形,挑選統計資 料內中,平均降雨強度較弱的2個颱風個案,柯吉拉(2003)與南卡 (2003),藉此了解平均降雨強度弱颱風個案的情形。

柯吉拉(2003),移動至菲律賓東方海面後,轉向西北朝台灣東南 方海面移進,移入台灣東南方海面後速度趨緩,而後快速通過台灣東 方海面(圖 3.5a)。模式預測全台的累積雨量皆低於100毫米(圖 3.5b), 實際觀測柯吉拉颱風之降雨強度,無論是平地或山區其降雨量皆低於 100毫米(圖 3.5c),模式的預報降水以高估居多,只有少數測站的預 報雨量是低估的情形(圖 3.5d)。

南卡(2003),颱風形成後向東北移動,經過台灣東南方海域,而 後在日本南方海面減弱為熱帶性低氣壓(圖 3.6a)。模式預測全台的累 積雨量皆低於 100 毫米(圖 3.6b),實際觀測南卡颱風之降雨強度,全 台皆低於 100 毫米,降水的位置在台灣東部(圖 3.6c),模式的預報降 水高估居多,只有少數測站的預報雨量是低估的(圖 3.6d)。

綜上所述,平均降雨強度較強的颱風個案中,模式的雨量預測是 可以捕捉到強降水發生的區域,然而,地形上的模式預測降水都有較 為明顯的雨量低估情形。只有在少許的區域,預測的雨量才會有高估 實際降雨的情形,而且在模式雨量高估的地區,也往往不是颱風的強 降水區。在平均降雨強度較弱的颱風個案中,模式的預報雨量多高估 實際降雨,只有少部分的區域的預報雨量會有低估的情形。本研究則 著重於修正強降水地區之預測雨量與實際降雨的誤差,試圖改進強降 水地區的降雨強度預報,使預報結果可以更加接近實際情況。



第四章 氟候模式之改進及評估

(一)地形效應與預報誤差的關係

前一章已介紹傳統的地形降水模式,並且了解此模式對於颱風降 雨有一定程度的低估,且比較嚴重的雨量低估情形常常位在地形上。 過去的研究(Yu and Cheng 2013、2014)指出一些颱風個案在局部山 區造成的降水加強與地形引發的垂直速度局部最大值有關聯,顯示地 形斜坡舉升凝結機制對於山區降水加強有貢獻。

為了瞭解地形引發的垂直速度與預報誤差之間的關係,我們計算 地形引發的垂直速度,地形引發的垂直速度 ω 即(v̄·Vh)可由下列方 程式求得:

$$\omega \approx \vec{u} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \vec{v} \cdot \frac{\partial h}{\partial y}$$
(4.1)

其中 ū、 ⊽ 分別為東西向與南北向的風速分量(單位為m s⁻¹),h 為 高度(單位為公尺), ∂h/∂x、 ∂h/∂y分別是東西向與南北向的地形 坡度。(4.1)是常常被利用來評估地形抬升效應對降水的重要性(Lin et al. 2001;Neiman et al. 2002;Seorgis et al. 2003)。 圖(4.1)是透過(4.1)式假設台灣當時吹的風向為 270 度、風速 30 m s⁻¹ 與 DTM(1 km*1 km)地形資料計算而得到的地形引發的垂直速度的水 平分布之示意圖。計算各測站之地形引發的垂直速度時需要有該位置 的風速,因為測站觀測到的風已經受到地形影響,日後運用此模式預 報颱風降雨時也能有風的資訊,所以使用 Johnny C. et al (1987)之切 向風距離颱風中心遠近之強度變化的方程式:

$$\mathbf{v}_{\mathrm{r}} = \mathbf{v}_{\mathrm{m}} \times \frac{\mathbf{r}}{\mathbf{r}_{\mathrm{m}}} \times \exp\{\frac{1}{b} \times \left[1 - \left(\frac{\mathbf{r}}{\mathbf{r}_{\mathrm{m}}}\right)^{b}\right]\}$$
(4.2)

其中 r 為與颱風中心的距離, vm 為颱風的最強風速, rm 為最大風速半徑, b 是一個可以控制渦流形狀的因子為常數。這邊 b 的值為 0.5(Smith R.B. et. al 2009)。圖(4.2)是利用(4.2)式之切向風距離颱風 中心遠近之強度變化圖,最大風速出現的位置在眼牆附近,隨著距離 颱風中心愈遠,切向風的風速愈小。颱風影響台灣期間時,各測站之 地形引發的垂直速度會因為颱風相對於測站的位置而改變,為了不受 颱風與測站的相對位置影響,進而統計地形引發的垂直速度大於1m S⁻¹的頻率(以下頻率皆為大於1mS⁻¹),因為各個颱風個案影響台灣 的時間長短不同所以將降雨誤差標準化,標準化方法如下:

 $(R_m - R_o)/R_0 \tag{4.3}$

其中R_m為模式預測的雨量、R_o為實際觀測的雨量,統計 1997~2012 年 62 個颱風標準化後的降雨誤差以及地形引發的垂直速度的頻率之 間的關係。挑選 RMSE_{nor} 值較接近 0,而且平均降雨強度較強的 4 個統計資料中的颱風個案,海棠(2005)、薔蜜(2008)、辛樂克(2008) 以及莫拉克(2009),單獨了解颱風個案其降雨誤差與地形引發的垂直 速度的頻率之間的關係。

海棠颱風期間地形引發的垂直速度的頻率大的區域,集中在中央 山脈的中部,次高的頻率分布於中央山脈北端(圖 4.3),圖(4.4)為各 個測站的預報誤差與地形引發的垂直速度的頻率的點散圖,因為焦點 放在地形引發垂直速度的頻率與預報誤差的關係,而地形引發的垂直 速度的頻率等於 0 的地區會模糊整個結果,故這邊先刪除頻率等於 0 的點。海棠颱風個案中,預報誤差與地形引發的垂直速度的頻率有正 相關,即地形引發的垂直速度的頻率愈大,預報的誤差愈多,兩者的 相關係數為-0.41,相關係數為負數,表示模式預測的雨量低於實際 雨量。

薔蜜颱風期間地形引發的垂直速度的頻率較大的區域分布於中 央山脈北部以及中部,山脈中部有一極值(圖 4.5),圖(4.6)為各個測 站的預報誤差與地形引發的垂直速度的頻率的點散圖,薔蜜颱風個案 中,兩者的相關係數為-0.11。

辛樂克颱風期間地形引發的垂直速度的頻率較大的區域為在中 央山脈的北部,山脈中部也有相對大的區域,而地形引發的垂直速度

的頻率大區域也多位在地形上(圖 4.8), 圖(4.9)為各個測站的預報誤 差與地形引發的垂直速度的頻率的點散圖,辛樂克颱風個案,兩項參 數之相關係數則有-0.59。

莫拉克颱風期間地形引發的垂直速度頻率較大的區域多位在中 央山脈北部以及中部,山脈中部有一極值(圖 4.9),圖(4.10) 是各個 測站的預報誤差與地形引發的垂直速度的頻率的點散圖,莫拉克颱風 個案兩者的相關係數為-0.19。

為了更進一步的了解颱風個案對於降雨誤差與地形引發的垂直 速度的頻率之間的關係,挑選統計資料內中,平均降雨強度較弱的2 個颱風個案,柯吉拉(2003)與南卡(2003),藉此了解平均降雨強度弱 颱風個案的情形。

柯吉拉颱風期間地形引發的垂直速度的頻率較大的區域多位在 台灣東側的地形上面以及台東山區(圖 4.11),圖(4.12)是各個測站的 預報誤差與地形引發的垂直速度的頻率的點散圖,柯吉拉颱風個案兩 者的相關係數為 0.4。

南卡颱風期間地形引發的垂直速度的頻率較大的區域多位在台灣東側的地形上面以及台東山區(圖 4.13),圖(4.14)是各個測站的預報誤差與地形引發的垂直速度的頻率的點散圖,南卡颱風個案兩者的相關係數為 0.78。

綜上所述,在平均降雨強度較強的颱風個案當中可以發現,地形 引發的垂直速度的頻率與預報降雨的誤差是有正相關,即頻率愈大則 預報的誤差愈多,在強降水的颱風多為低估的情況。而在平均降雨強 度較弱的颱風個案則可以發現,因為颱風造成的降雨很小,接近 0, 而模式的預報雨量假設為 10 毫米,但是在標準化過後,其降雨誤差 會高達 20,統計時就要考慮這個事情。

因為觀測資料上的缺乏,62個颱風之中有19個颱風沒有辦法計

算地形引發的垂直速度,我們分析 1997~2012 年 43 個颱風的降水 預報誤差以及地形引發的垂直速度的頻率,降水誤差只統計各個颱風 個案前 30%降水的資料,兩項參數之間的關係如圖(4.15),然而,因 為將焦點放在地形引發的垂直速度的頻率與降雨誤差的關係上,有些 測站雖然位在前 30%的降水區內但是計算後的地形引發的垂直速度 的頻率等於 0,刪除這些頻率等於 0 的點如圖(4.16),最後排除誤差 大於 1 的點,只統計降雨誤差介於 1~-1 之間,與地形引發的垂直速 度的頻率的關係(圖 4.17),兩個參數的相關係數為-0.4,並且得到一 線性方程式:

$$Y = -0.0028X - 0.0163 \tag{4.4}$$

未來在預報颱風雨量時可以觀測並計算該測站地形引發的垂直速度的頻率,並且利用(4.4)式修正傳統氣候模式前 30%降雨區域的原始預測雨量。

(二)氟候模式之評估

為了評估修正後的氣候模式的表現,利用修正後的氣候模式對 1997~2012年62個颱風進行降雨預報,並挑選RMSEnor值較接近 0,而且平均降雨強度較強的颱風個案,海棠颱風(2005)、薔蜜颱風 (2008)、辛樂克颱風(2008)以及莫拉克颱風(2009),初步觀察這些個 案的降雨分布特徵並與改進前的模式預報的雨量作比較。

修正後的模式預報海棠颱風(2005)的雨量分布如圖(4.18),與傳 統氣候模式預報之雨量分布(圖 3.1b)以及海棠颱風期間實際觀測之 降雨分布(圖 3.1c)比較,可以觀察到中央山脈北段有一個區域的預測 降雨由約略 300~400 毫米提升至 600~700 毫米,南部山區的降 雨量經由修正後也較接近實際觀測。比較傳統氣候模式與實際雨量之 差異分布(圖 3.1d)與修正後氣候模式與實際雨量之差異分布(圖 4.19), 中央山脈北段以及南部山區這兩個區域,雨量預測低估的情形有改 善。

修正後的模式預報薔蜜颱風(2008)的雨量分布如圖(4.20),與傳統氣候模式預報之雨量分布(圖 3.2b)以及薔蜜颱風期間實際觀測之 降雨分布(圖 3.2c)比較,薔蜜颱風在台灣有兩處局部降雨最大值的位 置分別在中央山脈北段以及中段,傳統氣候模式低估了北部區域的降 雨最大值以及中央山脈中段的雨量,修正後的模式預報降雨時則上調 了中央山脈北段的雨量,由原先400~600mm提升至600~800mm, 山脈中段的預報雨量也有提升。比較傳統氣候模式與實際降雨之差異 分布(圖 3.2d)與修正後模式預測雨量與實際降雨之差異分布(圖 4.21), 傳統氣候模式經由修正後,預報雨量低估的區域範圍變的比較小。

修正後的模式預報辛樂克颱風(2008)的雨量分布如圖(4.22),與 傳統氣候模式預報之雨量分布(圖 3.3b)以及辛樂克颱風期間實際觀 測之降雨分布(圖 3.3c)比較,可以發現中央山脈的降雨量有明顯的提 升,也是較接近實際降雨。比較傳統氣候模式與實際降雨之差異分布 (圖 3.3d)與修正後模式預測雨量與實際降雨之差異分布(圖 4.23), 可以發現原先低估 300 ~ 500 毫米的區域的範圍小了許多,然而在 這個颱風個案裡,中央山脈北段有一區域原先是沒有太明顯的高估, 但經由修正後的模式,雨量預報則變為高估 200 ~ 300 毫米。

修正後的模式預報莫拉克颱風(2009)的雨量分布如圖(4.24),與 傳統氣候模式預報之雨量分布(圖 3.4b)以及莫拉克颱風期間實際觀 測之降雨分布(圖 3.4c),可以觀察南部山區的降雨分布,傳統模式預 測雨量1400~1500毫米的區域經由修正後,增加至1500 毫米以上, 周邊山區的降雨皆有往上修正進而更接近實際降雨,中部山區的預測 雨量也有往上提升。比較傳統氣候模式與實際與降雨之差異分布(圖 3.4d)與修正後模式預測雨量與實際降雨之差異分布(圖 4.25),南部山 區經由修正後模式的雨量預測,低估的情況有稍微的改善,整塊低估 的區域有稍微接近實際降雨,但在不是地形的地方,低估的情況就沒

有得到改善。

評估改進後的模式預測 1997~2012 年包含在模式的統計內的颱 風個案,因為觀測資料上的缺乏,62 個颱風之中有 19 個颱風無法計 算地形引發的垂直速度,故在評估傳統模式與改進後的模式時,只評 估 43 個颱風個案。利用(3.1)式計算 RMSE,針對該颱風個案的所有 測站,改進後的氣候模式的 RMSE 減去傳統氣候模式的 RMSE,如 圖(4.26);只有評估前 30%的降雨區域如圖(4.27),利用 RMSE 評估 可以發現大部分的颱風個案相減的 RMSE 為負數,表示修正後的模 式比較接近實際觀測,變化的比例表示修正後的模式 RMSE 不管變 高或變低,其增減的比例是多少,可以發現有些颱風個案 RMSE 變 化很小,但是它的變化比例約 10%~20%,表示這些颱風個案,對 台灣並沒有造成多少降雨。而單獨評估前 30%的降雨區域,改善的 情況更加顯著,表示修正後的氣候模式對於強降雨的預報能力有較明 顯的提升。

(三)氣候模式之預報

利用修正後的氣候模式預報統計資料外的颱風降雨,並與傳統氣 候模式之預報結果比較。

蘇力(2013)接近台灣東北部海面時略為向西北移動,於新北市跟 宜蘭縣交界處登陸,而後由新竹附近出海(圖 2.28a)。傳統氣候模式 預測之雨量分布(圖 4.28b)與蘇力颱風期間實際觀測之雨量分布 (4.28c)作比較,預報颱風之降雨分布的表現是不錯的,苗栗山區以及 中央山脈南段共3處總雨量最大值的區域是有被預報出來的,然而總 降雨量則有相當大的落差,在苗栗山區與中央山脈南段的實際觀測之 總雨量約為500 豪米以上,最大值則大約落在650毫米以上,但是 傳統模式預測時只有約200~300毫米,最大也只有350毫米以上。 而經由修正後的模式預報降雨(圖 4.28d),在苗栗山區的雨量則有往 上修正到 350 毫米,其餘兩處雨量最大值區域也有修正至 350 毫米。

麥德姆(2014),由台東長濱登陸,而後在彰化附近出海(圖 4.29a)。 傳統氣候模式之雨量分布(圖 4.29b)與麥德姆颱風期間實際觀測之雨 量分布(4.29c)作比較,預報颱風之降雨分布的表現也是不錯,東部山 區以及中央山脈南段之總雨量最大值的區域都有預報出來,但是跟蘇 力颱風一樣有低估的情況,實際觀測約 400~550 毫米的雨量,模式 則只有預報 200~300 毫米,修正後的模式預報降雨(圖 4.29d),傳 統模式預報約 200~300 毫米的區域都有約略上修,預報雨量達 300 毫米以上的區域有變廣,有一區域降雨量則有上修至 350 毫米以上。

綜合上面兩個颱風個案之預報結果,不管是傳統氣候模式或者是 修正後的氣候模式對於預報颱風的降水分布有一定的表現,但是總降 雨量的預測上,則有相當程度的低估,但此傳統模式經由地形引發的 垂直速度的頻率修正後,低估降雨量的情況是有被改善的,然而改善

的幅度有限。



第五章 結論與未來展望

(一)結論

本研究透過全台各地的雨量站配合颱風移動路徑統計出颱風降 雨資料庫,並利用此資料庫建立颱風降雨氣候模式,接著分析氣候模 式預報的雨量誤差與地形所引發垂直速度的頻率,試圖了解兩者的關 係,利用這個關係改善傳統颱風降雨氣候模式,實際預報並評估傳統 氣候模式與修正後氣候模式的結果。整合前幾章的結果,主要的結論 如下:

- 利用傳統氣候模式進行颱風雨量的預報時,預報的降水分布有不錯 的表現,可以預報出颱風的降雨特徵,但是對於颱風主要降水區的 總雨量預報多半是低估的,低估的區域多半位於地形上,進行預報 時上也會有雨量高估的地區,但是位置通常都在實際雨量相對少的 區域。
- 2.利用高解析度的地形資料與颱風的最大風速及最大風速半徑計算 地形引發的垂直速度大於1ms¹的頻率,分析此頻率分布與降雨 預報誤差之間的關係,顯示預報誤差與地形所引發的垂直速度大於 1ms¹的頻率有正相關,地形引發的垂直速度大於1ms¹的頻率 愈大則預報的誤差愈大,兩者之間的相關系數為-0.4,顯示模式預 報前 30%降雨區域的雨量是低估的。透過分析預報誤差與地形所 引發的垂直速度大於1ms¹的頻率得到一線性方程式,利用此方 程式修正傳統氣候模式,未來預報時可以利用地形所引發的垂直速 度大於1ms⁻¹的頻率修正氣候模式的誤差。
- 3.修正後的氣候模式對於颱風降雨分布及強度的預報,降雨分布與修 正前一樣具有一定的掌握能力,客觀評估傳統氣候模式與修正後的 氣候模式預報的雨量,顯示修正後的模式對大部分颱風個案雨量預 報的準確度有改善,但是改善之幅度有限,整體而言修正後的氣候

模式的預報準確度提升的情形並不明顯。單獨評估前 30%的降水 區域可以看出修正後的降雨氣候模式對於主要降水區域的雨量預 報則有較顯著的改善,顯示修正後的氣候模式對於強降雨預報能力 有較明顯的提升。

(二)未來展望

本研究主要針對颱風降雨氣候統計模式的預報誤差與地形的 關係進行分析欲求改善傳統颱風降雨氣候模式。此研究使我們對於 傳統颱風降雨氣候模式之改進有初步的方向,亦對地形引發的垂直 速度與颱風的模式預報降雨與實際降雨的誤差之間的關係有進一 步的了解。然而還有許多會影響颱風降雨的物理因子或動力機制尚 未被考慮,如大環境的水氣場、颱風本身的背景降水以及颱風與東 北、西南季風之間的共伴效應等,未來亦可試著加入於模式當中, 以期對颱風降雨氣候統計模式之發展能有更進一步的貢獻。



參考文獻

- 林熹閔與郭鴻基,1997:1994 年南台灣夏季午後對流之研究。大氣 科學,24,249-280。
- 鄭凌文,2006:北台灣地形隊颱風降水分佈及強度之影響:象神颱 風雷達觀測研究,中國文化大學地學研究所大氣科學組碩士論 文,71頁。
- Barstad, I. and R. B. Smith, 2005: Evaluation of an orographic precipitation model. *J. Hydrometeor*, **6**, 85-99.
- Chan, J. C., and R. T. Williams, 1987: Analytical and numerical studies of the beta-effect in tropical cyclone motion. Part 1: Zero mean flow. *J. Atmos. Sci.*, 44, 1257–1265.
- Chang, C. P., Yeh, T. C., and Chen, J. M.: 1993, Effects of terrain on the surface structure of typhoons over Taiwan, *Mon. Weather.* Rev. 121, 734–752
- Georgis, J.-F., F. Roux, M. Chong, and S. Pradier, 2003 : Triple-Doppler radar analysis of the heavy rain event observed in the Lago Maggiore region during MAP IOP 2b. Quart. J. Roy. *Meteor. Soc.*, 129, 495-522.
- Houze, R. A., Jr., 1993: Cloud Dynamics, Academic Press, 573 pp.
- Lee, C. S., Huang, L. R., Shen, H. S., and Wang, S. T.: A climatological model for forecasting typhoon rainfall in Taiwan, *Nat. Hazards*, 37, 87–105, 2006.
- Li, J., and Y.- L. Chen, 1998: Barrier jets during TAMEX. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 959-971
- Lin, Y.- L., S. Chiao, T.-A. Wang, M. L. Kaplan, and R. P. Weglarz, 2001 : Some common ingredients for heavy orographic rainfall.

wea. Forecasting., 16, 633-660.

- Neiman, P. J., F. M. Ralph, A. B. White, D. E. Kingsmill, and P. O. G.
 Persson, 2002 : The statistical relationship between upslope
 flow and rainfall in California's coastal mountains : Observations
 during CALJET. Mon. *Wea. Rev.*, 130, 1468-1492.
- Smith, R. B., P. Schafer, D. J. Kirshbaum, and E. Regina, 2009:
 Orographic precipitation in the tropics: Experiments in
 Dominica. *J. Atmos. Sci.*, 66, 1698-1716.
- Smith, R. B., P. Schafer, D. J. Kirshbaum, and E. Regina, 2009a: Orographic enhancement of precipitation inside Hurricane *Dean. J. Hydrometeor.*, 10, 820–831.
- Vignal, B., G. Galli, J. Joss, and U. Germann, 2000: Three methods to determine profiles of reflectivity from volumetric radar data to correct precipitation estimates. *J. Appl. Meteor.*, **39**, 1715-1726.
- Wu, C. -C., and Y. -H. Kuo, 1999: Typhoons affecting Taiwan :
 Current understanding and future challenges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 67-80.
- Yu, C.- K., and L.- W. Cheng, 2008: Radar observations of intense orographic precipitation associated with Typhoon Xangsane (2000). *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 497–521.
- Yu, C.- K., and L.- W. Cheng, 2013: Distribution and mechanisms of orographic precipitation associated with Typhoon Morakot (2009). J. Atmos. Sci., 70, 2894-2915.
- Yu, C.- K., and L.- W. Cheng, 2014: Dual-Doppler-derived profiles of the southwesterly flow associated with southwest and ordinary typhoons off the southwestern coast of Taiwan. J. Atmos. Sci., 71, 3202-3222.

		歷時		近中心最大風	最大風速半徑
年份.颱風名稱	起訖時間(UIC)	起訖時間(UTC)		速(公尺/秒)	範圍(公里)
1997.AMBER	1997/08/28 05:00 ~ 1997/08/29 13:00	33	中度	48	_
1998.BABS	1998/10/27 06:00 ~ 1998/10/27 12:00	7	中度	35	_
1998.NICHOLE	1998/07/08 21:00 ~ 1998/07/10 00:00	28	輕度	18	_
1998.OTTO	1998/08/03 18:00 ~ 1998/08/04 23:00	30	輕度	30	_
1998.YANNI	1998/09/27 11:00 ~ 1998/09/29 01:00	39	輕度	25	_
1998.ZEB	1998/10/15 13:00 ~ 1998/10/16 11:00	23	強烈	55	_
1999.MAGGIE	1999/06/05 20:00 ~ 1999/06/06 03:00	8	中度	38	_
2000.BILIS	2000/08/22 04:00 ~ 2000/08/23 01:00	22	強烈	53	_
2000.BOPHA	2000/09/09 13:00 ~ 2000/09/10 05:00	17	輕度	23	_
2000.KAI-TAK	2000/07/08 19:00 ~ 2000/07/09 11:00	17	中度	35	_
2000.XANGSANE	2000/10/31 14:00 ~ 2000/11/01 06:00	17	中度	38	_
2001.CHEBI	2001/06/22 20:00 ~ 2001/06/23 17:00	22	中度	35	_
2001.CIMARON	2001/05/13 01:00 ~ 2001/05/13 11:00	2.11	輕度	23	_
2001.LEKIMA	2001/09/25 20:00 ~ 2001/09/28 06:00	59	中度	35	27.78 ~ 55.56
2001.NARI	2001/09/15 15:00 ~ 2001/09/19 12:00	94	中度	40	46.3 ~ 92.6
2001.TORAJI	2001/07/29 01:00 ~ 2001/07/30 19:00	43	中度	38	64.82 ~ 74.08
2001.TRAMI	2001/07/10 13:00 ~ 2001/07/11 12:00	\$24	輕度	20	74.08 ~ 92.60
2002.NAKRI	2002/07/08 22:00 ~ 2002/07/10 15:00	42	輕度	18	70.08 ~ 129.6
2003.DUJUAN	2003/09/01 12:00 ~ 2003/09/01 21:00	10	中度	43	18.52 ~ 18.52
2003.KUJIRA	2003/04/23 14:00 ~ 2003/04/24 08:00	19	中度	43	64.82 ~ 111.1
2003.MELOR	2003/11/02 12:00 ~ 2003/11/03 13:00	26	輕度	25	37.04 ~ 83.34
2003.MORAKOT	2003/08/03 06:00 ~ 2003/08/04 08:00	27	輕度	23	64.82 ~ 64.82
2003.NANGKA	2003/06/02 14:00 ~ 2003/06/02 20:00	7	輕度	23	55.56 ~ 166.6
2003.SOUDELOR	2003/06/17 08:00 ~ 2003/06/17 17:00	10	中度	38	51.85 ~ 64.82
2003.VAMCO	2003/08/19 11:00 ~ 2003/08/19 19:00	9	輕度	18	55.56 ~ 92.6
2004.AERE	2004/08/24 04:00 ~ 2004/08/25 13:00	34	中度	38	_
2004.CONSON	2004/06/09 01:00 ~ 2004/06/09 11:00	11	中度	33	_
2004.HAIMA	2004/09/11 12:00 ~ 2004/09/12 13:00	26	輕度	18	74.08 ~ 74.08
2004.MINDULLE	2004/06/30 22:00 ~ 2004/07/02 12:00	39	中度	45	_
2004.NANMADOL	2004/12/03 17:00 ~ 2004/12/04 06:00	14	中度	38	_
2004.NOCK-TEN	2004/10/24 10:00 ~ 2004/10/25 12:00	27	中度	43	_
2005.HAITANG	2005/07/17 13:00 ~ 2005/07/19 09:00	45	強烈	55	18.52 ~ 27.78
2005.KHANUN	2005/09/10 17:00 ~ 2005/09/10 19:00	3	中度	43	18.52 ~ 18.52

表1 颱風基本資訊,颱風個案之起訖時間、歷時,強度、近中心最大 風速,最大風速半徑範圍。

表1續

左心 四日 月初			山山	近中心最大風	最大風速半徑
千伤.颱風名稗	起記时间(010)	(小時)	强度	速(公尺/秒)	範圍(公里)
2005.LONGWANG	2005/10/01 13:00 ~ 2005/10/02 11:00	23	強烈	51	18.52 ~ 25.92
2005.MATSA	2005/08/04 16:00 ~ 2005/08/05 03:00	12	中度	40	27.78 ~ 27.78
2005.TALIM	2005/08/31 08:00 ~ 2005/09/01 09:00	26	強烈	53	18.52 ~ 27.78
2006.BILIS	2006/07/13 00:00 ~ 2006/07/14 05:00	30	輕度	25	83.34 ~ 83.34
2006.BOPHA	2006/08/08 06:00 ~ 2006/08/09 05:00	24	輕度	23	55.56 ~ 70.37
2006.CHANCHU	2006/05/18 04:00 ~ 2006/05/18 06:00	3	中度	45	37.04 ~ 51.85
2006.KAEMI	2006/07/24 02:00 ~ 2006/07/25 06:00	29	中度	38	27.78 ~ 27.78
2006.SAOMAI	2006/08/09 18:00 ~ 2006/08/09 21:00	4	中度	48	18.52 ~ 18.52
2007.KROSA	2007/10/05 22:00 ~ 2007/10/07 02:00	29	強烈	51	27.78 ~ 46.30
2007.PABUK	2007/08/07 05:00 ~ 2007/08/08 00:00	20	輕度	28	46.30 ~ 55.56
2007.SEPAT	2007/08/17 08:00 ~ 2007/08/18 20:00	37	強烈	53	18.52 ~ 105.5
2007.WIPHA	2007/09/18 00:00 ~ 2007/09/18 12:00	13	中度	48	18.52 ~ 37.04
2007.WUTIP	2007/08/08 11:00 ~ 2007/08/09 00:00	14	輕度	18	64.82 ~ 74.08
2008.FUNG-WONG	2008/07/27 08:00 ~ 2008/07/28 19:00	36	中度	43	27.78 ~ 74.08
2008.JANGMI	2008/09/27 17:00 ~ 2008/09/29 04:00	36	強烈	53	27.78 ~ 64.82
2008.KALMAEGI	2008/07/16 18:00 ~ 2008/07/18 05:00	36	中度	33	27.78 ~ 55.56
2008.SINLAKU	2008/09/12 11:00 ~ 2008/09/15 00:00	62	強烈	51	27.78 ~ 46.30
2009.LINFA	2009/06/21 19:00 ~ 2009/06/22 00:00	Nº 6	輕度	28	37.04 ~ 59.26
2009.MORAKOT	2009/08/06 20:00 ~ 2009/08/09 05:00	58	中度	40	27.78 ~ 111.1
2010.FANAPI	2010/09/18 15:00 ~ 2010/09/19 19:00	29	中度	45	27.78 ~ 27.78
2010.LIONROCK	2010/08/31 18:00 ~ 2010/09/01 13:00	20	輕度	23	37.04 ~ 46.30
2010.MERANTI	2010/09/06 23:00 ~ 2010/09/09 21:00	44	輕度	23	27.78 ~ 64.82
2010.NAMTHEUN	2010/08/29 16:00 ~ 2010/08/31 12:00	42	輕度	18	27.78 ~ 83.34
2011.AERE	2011/05/10 07:00 ~ 2011/05/10 11:00	5	輕度	23	74.08 ~ 74.08
2011.NANMADOL	2011/08/28 09:00 ~ 2011/08/30 15:00	55	強烈	53	55.56 ~ 64.82
2011.SONGDA	2011/05/27 18:00 ~ 2011/05/27 22:00	5	強烈	55	37.04 ~ 37.04
2012.SAOLA	2012/07/31 23:00 ~ 2012/08/02 18:00	44	中度	38	27.78 ~ 51.85
2012.TALIM	2012/06/20 05:00 ~ 2012/06/20 17:00	13	輕度	25	85.19 ~ 85.19
	2012/08/22 20:00 ~ 2012/08/24 19:00	47		٨F	07.70 55.50
2012. I EIVIBIN	2012/08/27 13:00 ~ 2012/08/28 16:00	29	甲度	/2 4 0	21.10 ~ 00.00

	RMSE	平均降雨量	平均降雨强度	
年份.颱風名稱		(mm)	(mm/hr)	RMSEnor
1997.AMBER	79.63	123.39	3.44	0.29
1998.BABS	9.70	2.35	0.35	2.64
1998.NICHOLE	27.74	31.33	1.26	0.42
1998.OTTO	57.98	114.99	4.13	0.32
1998.YANNI	47.89	69.49	1.83	0.50
1998.ZEB	96.71	156.47	6.75	0.48
1999.MAGGIE	12.75	26.43	3.16	0.24
2000.BILIS	83.24	139.74	5.72	0.45
2000.BOPHA	15.57	11.12	0.57	1.53
2000.KAI-TAK	32.59	65.30	3.41	0.39
2000.XANGSANE	62.03	125.75	6.88	0.35
2001.CHEBI	26.20	44.56	2.22	0.33
2001.CIMARON	10.54	11.12	versi0.99-16	0.49
2001.LEKIMA	50.59	147.02	2.19	0.26
2001.NARI	171.29	442.15	4.16	0.43
2001.TORAJI	69.66	185,13	4.23	0.24
2001.TRAMI	40.08	20.93	0.86 ^{IE}	1.29
2002.NAKRI	49.66	90.32	Cult216 Uni	0.43
2003.DUJUAN	22.22	42.08	4.14	0.31
2003.KUJIRA	12.10	1.03	0.05	7.46
2003.MELOR	36.28	14.57	0.55	1.76
2003.MORAKOT	38.48	78.10	2.85	0.35
2003.NANGKA	4.03	0.15	0.02	13.15
2003.SOUDELOR	14.18	11.44	1.13	0.62
2003.VAMCO	7.54	4.97	0.54	0.93
2004.AERE	98.50	210.07	5.94	0.32
2004.CONSON	14.38	9.68	0.87	0.95
2004.HAIMA	32.93	41.34	1.55	0.60
2004.MINDULLE	50.12	197.51	4.95	0.20
2004.NANMADOL	16.16	57.90	4.06	0.21
2004.NOCK-TEN	35.09	51.17	1.87	0.50
2005.HAITANG	112.18	333.52	7.20	0.26
2005.KHANUN	4.90	5.23	1.70	0.41

表 2 不同颱風個案之模式表現評估,模式預測雨量的 RMSE、 颱風的平均降雨量、颱風的平均降雨強度,及標準化後的 RMSE。

年份 贻固名稱	RMSE	平均降雨量	平均降雨强度	RMSE
	RIVIOL	(mm)	(mm/hr)	KWGEnor
2005.LONGWANG	39.89	83.80	3.54	0.28
2005.MATSA	62.12	84.02	6.73	0.46
2005.TALIM	95.30	200.57	7.35	0.37
2006.BILIS	62.82	136.90	4.44	0.35
2006.BOPHA	23.85	44.16	1.81	0.36
2006.CHANCHU	3.71	2.56	0.83	0.75
2006.KAEMI	30.94	75.89	2.58	0.31
2006.SAOMAI	4.50	1.82	0.46	1.35
2007.KROSA	123.01	236.80	7.96	0.37
2007.PABUK	31.58	66.75	3.28	0.28
2007.SEPAT	72.15	187.03	4.99	0.27
2007.WIPHA	48.88	80.81	6.00	0.37
2007.WUTIP	35.42	32.30	2.27	0.69
2008.FUNG-WONG	77.69	187.78	ersit 4.92-16	0.32
2008.JANGMI	86.89	251.75	6.51	0.28
2008.KALMAEGI	129.77	275.11	7.12	0.36
2008.SINLAKU	126.93	415.63	6.39	0.22
2009.LINFA	7.43	3.96	0.62	1.09
2009.MORAKOT	232.54	563.63	Culter 15 Uni	0.28
2010.FANAPI	86.14	185.37	5.83	0.28
2010.LIONROCK	23.65	42.98	1.99	0.36
2010.MERANTI	31.97	46.24	0.96	0.50
2010.NAMTHEUN	92.16	37.39	0.82	1.97
2011.AERE	3.54	0.32	0.06	6.72
2011.NANMADOL	51.96	153.14	2.47	0.25
2011.SONGDA	5.03	1.73	0.33	1.56
2012.SAOLA	106.94	284.30	4.76	0.27
2012.TALIM	18.68	63.01	3.55	0.18
2012.TEMBIN	88.46	121.47	1.21	0.50

表2續


圖 1.1 地形降水機制示意圖。(a)種饋機制(Seeder-feeder mechanism);
(b)地形斜坡強迫舉升凝結機制(Upslope forcing);(c)地形斜坡激發機制
(Upslope trigger -ing);(d)地形上游減速激發機制(Upstream triggering);
(e)熱力激發機制(Thermal triggering);(f)背風面輻合激發機制(Lee-side triggering);(g)背風面重力波加強機制(Lee-side enhancement by gravity)(圖摘取自 Houze 1993)



圖 1.2 颱風降水分布圖。(a)淡水河流域;(b)高屏溪流域。等值線為颱風在 位置時該流域的降雨強度(單位為 mm h⁻¹ 等值線為 3 mm h⁻¹,色階代 表降雨強度≧ 6 mm h⁻¹)。(圖摘取自 Lee et al. 2006)



圖 1.3 2002 年侵襲台灣的 3 個颱風路徑圖。(每點間距 3 個小時,數字是 颱風當時的日期時間(UTC),右側的(O)為實際累積降雨量,(M)為模 式預測累積降雨量,DSH 代表淡水河流域,KPS 代表高屏溪流域) (圖摘取自 Lee et al. 2006)



圖 2.1 台灣地形及測站分布圖。色階為地形高度,實心黑點是中央氣象局局 屬測站及自動觀測站,共 399 個測站。



圖 2.2 1997~2012 年 62 個颱風之颱風路徑圖。黑實線範圍為本研究之主要研究區域。



圖 2.3 1997~2012 年 62 個颱風經過圖(2.2)黑實線區域之颱風頻率分布圖。



圖 2.4 1997 年安珀颱風期間阿里山測站的降水分布圖。色階為安珀颱風經過 這個位置時,阿里山測站的降雨強度。實心三角形為阿里山測站所在的 位置。



圖 2.5 1997~2012 年間合計 62 個颱風之阿里山測站的降水分布圖。色階為 當颱風經過這個位置時,統計的阿里山測站之平均降雨強度。實心三角 形為阿里山測站的位置。颱風沒經過的位置色階為白色。



圖 2.6 1997~2012 年間合計 62 個颱風之阿里山測站的降水分布圖。色階為當 颱風經過這個位置時,統計的阿里山測站之平均降雨強度。與圖(2.5) 的差別為這張降雨分布圖使用雙線性內插法將颱風沒有經過的位置的 降雨強度資料補齊。



圖 3.1 海棠颱風之(a)颱風路徑圖、(b)模式預測雨量分布圖、(c)實際觀測雨 量分布圖、(d)模式預測雨量與實際觀測之差異分布圖。(b)、(c)灰 階為地形海拔高度[m],色階為總降雨量[mm],(d)灰階為地形海拔高 度[m],色階為模式降雨與實際降雨的誤差。



圖 3.2 同圖 3.1,但為薔蜜颱風。







圖 3.4 同圖 3.1,但為莫拉克颱風。







圖 3.6 同圖 3.1,但為南卡颱風(2003)。



圖 4.1 地形引發的垂直速度的水平分布圖。色階表示地形引發的垂直速度的數 值(單位為 m/s,間距標示於圖上方),灰階為地形海拔高度(單位為公 尺,間距標示於圖右側)。



圖 4.2 切向風距離颱風中心之風速變化圖。X 軸為離颱風中心的距離(單位為公里), Y 軸為風速(單位為 m/s)。



圖 4.3 海棠颱風(2005)侵襲期間地形引發的垂直速度的頻率的水平分布。色階 表示地形引發的垂直速度的數值(單位為 m/S,間距標示於圖上方), 灰階為地形海拔高度(單位為公尺,間距標示於圖右側)。



圖 4.4 海棠颱風(2005)侵襲期間的地形引發的垂直速度的頻率與預報降水誤 差之點散圖。X 軸為地形引發的垂直速度的頻率,Y 軸為標準化後的預 報降水誤差。黑實線是以最小平方法求得之線性迴歸線,相關係數標示 於圖上方。



圖 4.5 同圖 4.3,但為薔蜜颱風(2008)。



圖 4.6 同圖 4.4,但為薔蜜颱風(2008)。



圖 4.7 同圖 4.3,但為辛樂克颱風(2008)。



圖 4.8 同圖 4.4,但為辛樂克颱風(2008)。



圖 4.9 同圖 4.3,但為莫拉克颱風(2009)。



圖 4.10 同圖 4.4,但為莫拉克颱風(2009)。



圖 4.11 同圖 4.3,但為柯吉拉颱風(2003)。



圖 4.12 同圖 4.4,但為柯吉拉颱風(2003)。



圖 4.13 同圖 4.3,但為南卡颱風(2003)。



圖 4.14 同圖 4.4,但為南卡颱風(2003)。



圖 4.15 1997~2012 年 43 個颱風,地形引發的垂直速度的頻率與預報降水誤 差之點散圖。X 軸為地形引發的垂直速度的頻率,Y 軸為標準化後的預 報降水誤差。黑實線是以最小平方法求得之線性迴歸線,相關係數標示 於圖上方。



圖 4.16 同圖 4.11,但去除頻率等於 0 的點。



圖 4.17 同圖 4.11,但同時去除頻率等於 0 以及標準化後的誤差在-1~1之 間的點。



圖 4.18 海棠颱風(2005),改進後的模式預報降雨之水平分布圖。色階表示總 降雨量(單位為毫米,間距標示於圖上方),灰階為地形海拔高度(單位 為公尺,間距標示於圖右側)。



圖 4.19 海棠颱風(2005),改進後的模式預報雨量與實際降雨之差異分布圖。 色階表示誤差雨量(單位為毫米,間距標示於圖上方),灰階為地形海 拔高度(單位為公尺,間距標示於圖右側)。



圖 4.20 同圖 4.14,但為薔蜜颱風(2008)。



圖 4.21 同圖 4.15,但為薔蜜颱風(2008)。


圖 4.22 同圖 4.14,但為辛樂克颱風(2008)。



圖 4.23 同圖 4.15,但為辛樂克颱風(2008)。



圖 4.24 同圖 4.14,但為莫拉克颱風(2009)。



圖 4.25 同圖 4.15,但為莫拉克颱風(2009)。



圖 4.26 43 個颱風個案對所有測站之修正後模式的 RMSE 減去傳統氣候模式的 RMSE 長條圖。X 軸為颱風個案,Y 軸分別為 RMSE 數值(標示在圖的 左側), RMSE 變化的比例(標示在圖的右側)。



圖 4.27 43 個颱風個案對前 30%的降水區之修正後模式的 RMSE 減去傳統氣 候模式的 RMSE 長條圖。X 軸為颱風個案, Y 軸分別為 RMSE 數值(標 示在圖的左側), RMSE 變化的比例(標示在圖的右側)。



圖 4.28 蘇力颱風之(a)颱風路徑圖、(b)模式預測雨量分布圖、(c)實際觀測之雨 量分布圖、(d)修正後模式之預測雨量分布圖。(b)、(c)、(d)灰階為地形 海拔高度[m],色階為總降雨量[mm]。



