

國立臺灣大學理學院大氣科學系

碩士論文

Department of Atmosphere Sciences

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

西北太平洋颱風水氣與大氣溫度的關係

The Relation between Water Vapor in Typhoon and
Atmospheric Temperature over Western North Pacific

張原通

Yuan-Tong Chang

指導教授：許晃雄 博士

Advisor: Huang-Hsiung Hsu, Ph.D.

中華民國 101 年 7 月

July, 2012

誌謝

如果說這頁是自由的。

如果幻想推開嘎嘎作響的木扇門。

棕髮的護士長吸了一口氣，不敢相信眼前的場景，但她維持冷靜，指派所有工作，哨子聲伴隨著戴著口罩的工作人員穿梭於廳堂與房間，她雙手抱胸，背對著被撬開的鐵窗，開始數著報到的病人人數。

老狗永遠沉默不語，高聳地站在隊伍邊緣，在他旁邊是斑鳩、杜鵑還有同夥，顯然他們發明了一種以瓶蓋代替的曲棍球，工作人員要求交出掃把時，斑鳩還試圖以病癯的身子藏起長柄刷，而代替球門的長凳，其後方滿是凌亂的酒罐空瓶，它們跟一個不知何來的妓女都立刻被請出醫院大門。肥貓正想對妓女吹口哨，但他被護士長的棕眼一瞪，馬上立正站好，手指貼在肚子上。護士長表情肅穆，她的護士帽潔白挺立，而大廳下怯懦地面對她的是排成一列的病患。

「每個人把遺書拿出來，我馬上親自檢查。」護士長緩慢而堅定地命令，病患們皆拉開胸前的口袋掏找，肥貓把手伸進褲袋找了半天。一個工作人員向她回報：「還缺一個，蝙蝠。」

護士長和工作人員把原本放著掃帚的工具室打開，找到了灰塵裡的蝙蝠，他蒼白的手指緊抓著筆紙，細聲說：「我還沒，沒寫好。」護士長溫和地看著他：「這裡不舒服，我們先離開好嗎？」但他反抗工作人員的拉扯，顫抖地說：「還沒。」

「出來再寫好嗎？」護士長溫柔的語調瞬間結凍：「給我出來寫那個永遠寫不好的東西！」他尖叫一聲，紙條被護士長扯走。

「這就是你的遺書？」護士長的眼睛眯成一根刺針，她反手把它丟在地上，工作人員把蝙蝠拖出來，皮鞋踢在他肚子上。那張紙條被老狗拾起，他開了平生第一次口：「感謝閱讀這段文字的人，僅此而已。」

摘要

本研究以 ERA-interim 資料，欲探討 1979-2009 年西北太平洋地區，大氣溫度增加對颱風水氣的影響。利用迴歸分析和趨勢分析的方法，並以颱風水氣輻合作為中介點的角度，研究各尺度大氣溫度和各強度颱風總水氣量的關係。

從各尺度的迴歸分析發現，大尺度的大氣溫度和弱颱風水氣的相關較佳，強颱風則較差，利用年際差值的迴歸分析得知，西北太平洋六到十月平均的熱帶大氣溫度每上升一度，弱颱風的極端水氣(水氣值的最高 10%)將增加 7%，以 NCEP-CFSR 資料可以得到相似的弱颱風結果，但此研究於中颱風、強颱風並沒有顯著的相關。

年際變化的結果亦發現，西北太平洋平均大氣溫度上升，對弱颱風外圍水氣增加較明顯，而且高水氣的弱颱風對外圍水氣的反應比強颱風明顯，故推論大尺度大氣溫度增加，將提供弱颱風良好的水氣輻合環境，使最需環境支持的弱颱風水氣增加。

31 年趨勢分析發現，弱颱風的高水氣有增加的趨勢，強颱風的低水氣則有減少的趨勢，而兩者各自與其水氣輻合的趨勢相同，相關良好，並且和水氣增加率年代際變化的結果相呼應(弱颱風的水氣增加率變高，強颱風則變低)。而趨勢上弱颱風的低層輻合有增強趨勢，強颱風則因為外圍水氣減少的趨勢，但只有強颱風水氣和外圍水氣有高相關。

利用 MRI-AGCM 的模式資料，比較本世紀末和現在的差距，結果發現未來中颱風、強颱風於低水氣值時，水氣增加率將會提高，代表模式預估中颱風、強颱風的水氣會大幅提升，水氣值低的狀況不再。

關鍵詞：颱風水氣，大氣溫度，水氣增加率，趨勢分析，弱颱風水氣

Abstract

Data from ERA-interim (ECMWF) covering the period June-October in 1979-2009 are examined for the relation between total column water vapor in typhoons and column mean of temperature over western North Pacific. Moreover, we take water vapor convergence as in-between to analyse the relation above.

We find that water vapor in weak typhoons correlates with large scale temperature but water vapor in strong typhoons does not. The interannual results of regression analyses show that the top 10 % bin of water vapor in weak typhoons increases 7 % for each degree increase in atmospheric temperature over WNP. Furthermore, the water vapor in weak typhoons increases by environmental water vapor, which also increases by temperature over WNP.

From 31-year trend analyses, the yearly means of water vapor in weak typhoons are increasing, but water vapor in strong typhoons are decreasing. They correspond to the trends of water vapor convergence and the interdecadal changes of water vapor increase rate. Nevertheless, we find that the trend of water vapor in weak typhoons increases with convergence in 850 hPa; the trend of water vapor in strong typhoons decreases with environmental water vapor.

From MRI-AGCM (JMA) data, the results of interannual differences show that the lower parts of water vapor in strong typhoons will increase in the end of this century. At last, we discuss the differences from interannual and trend results in order to clarify how temperature affects water vapor in typhoons.

Keywords: water vapor in typhoon, water vapor increase rate, trend analysis, water vapor in weak typhoons

目錄

誌謝.....	ii
摘要.....	iii
Abstract.....	iv
目錄.....	v
表目錄.....	vii
圖目錄.....	viii
第一章 前言.....	1
1.1 增溫效應和大氣水氣.....	1
1.2 氣候變遷與熱帶氣旋.....	3
1.3 研究動機與論文架構.....	4
第二章 資料分析與研究方法.....	6
2.1 使用資料介紹.....	6
2.2 模式資料介紹與颱風偵測選取.....	7
2.3 時空尺度與使用資料比較.....	8
2.4 颱風之總水氣量定義與檢驗.....	10
2.5 簡單迴歸分析與年際相減迴歸分析.....	11
2.6 顯著性檢驗與蒙地卡羅法.....	13
第三章 颱風的水氣與溫度.....	14
3.1 颱風各尺度之迴歸分析.....	14
3.2 年際相減之迴歸分析.....	17
3.3 模式推估之未來颱風水氣研究.....	20
第四章 颱風的水氣輻合與其他.....	23
4.1 颱風水氣輻合的影響.....	23
4.2 颱風外圍水氣的影響.....	24
4.3 颱風低層輻合的影響.....	25

4.4 颱風水氣與降水分析	26
4.5 颱風水氣增加率與發展時間	27
第五章 颱風之時間趨勢和年代際變化	29
5.1 颱風趨勢分析	29
5.2 迴歸分析的年代際變化	31
第六章 結論與討論	34
6.1 結論	34
6.2 延伸討論	35
參考文獻	38
附表	411
附圖	466
附錄	1022



表目錄

表 3-1:年際相減迴歸分析中,颱風水氣和西北太平洋大氣季平均溫度之相關係數。橫軸為百分位組,縱軸為強度分類,從上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。(a) EC-interim 結果, (b) NCEP-CFSR 結果,粗體字代表通過 95%信心水準統計檢定。.....	41
表 3-2:西北太平洋 1979-2003 年所有熱帶氣旋的生命期長度,從上而下分別是觀測資料、MRI-AGCM(1979-2003)、MRI-AGCM(2075-2099)。引用陳 et al. (2011)。	42
表 3-3:年際相減迴歸分析中,颱風水氣和西北太平洋大氣季平均溫度之相關係數。橫軸為百分位組,縱軸為強度分類,從上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。(a) MRI-AGCM (1979-2003)結果,(b) MRI-AGCM (2075-2099)結果,最後一欄為中颱風加強颱風的結果,(c) MRI-AGCM (1979-2003, 2075-2099),粗體字代表通過 95%信心水準統計檢定。.....	43
表 4-1:年際相減迴歸分析中,颱風水氣和颱風水氣輻合量之相關係數。橫軸為百分位組,縱軸為強度分類,從上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。粗體字代表通過 95%信心水準統計檢定,紅字代表相關係數達 0.60。.....	44
表 4-2:年際相減迴歸分析中,颱風外圍水氣和西北太平洋大氣溫度之相關係數。橫軸為百分位組,縱軸為強度分類,從上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。粗體字代表通過 95%信心水準統計檢定。.....	44
表 4-3:年際相減迴歸分析中,颱風水氣和颱風外圍水氣之相關係數。橫軸為百分位組,縱軸為強度分類,從上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。粗體字代表通過 95%信心水準統計檢定,紅字代表相關係數達 0.70。.....	45
表 4-4:年際相減迴歸分析中,颱風水氣和颱風低層輻合之相關係數。橫軸為百分位組,縱軸為強度分類,從上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。粗體字代表通過 95%信心水準統計檢定。.....	45

圖目錄

- 圖 2-1：西北太平洋地區 1979-2009 年，六至十月，熱帶地區 ($100-180^{\circ}\text{E}$, $0-30^{\circ}\text{N}$) 之颱風所有時間點位置，而藍色方框為計算大氣溫度的區域($110-160^{\circ}\text{E}$, $10-30^{\circ}\text{N}$)。(a) 所有颱風資料(包含所有強度)，(b) 所有弱颱風(熱帶風暴等級)資料，(c) 所有中颱風(category 1 and 2)資料，(d) 所有強颱風(category 3, 4 and 5)資料。..... 46
- 圖 2-2：西北太平洋($10-30^{\circ}\text{N}$, $110-160^{\circ}\text{E}$)六至十月平均。依不同資料計算：藍色為 EC-interim、紅色為 NCEP-CFSR、綠色為 NCEP-R1、黑色為 SSM/I、灰色為 ERA40。右上為 interim 和 CFSR 之相關係數。(a) 平均海表面溫度(CFSR 以表面溫度代替)，(b) 平均大氣溫度 ($1000-200\text{hPa}$)，(c) 平均總水氣量 (NCEP-R1 為右方座標軸，其餘左方座標軸)。..... 48
- 圖 2-3：(a) 所有颱風(所有強度)的資料數，藍線代表時間點(time-steps)，綠線代表颱風數。(b) 三種強度分類的時間點資料數，淺藍色為弱颱風(TS)，深藍色為中颱風(TY)，黑色為強颱風(STY)。..... 49
- 圖 2-4：颱風範圍內資料計算示意圖。紫色點為最接近暴風中心之網格點。以紫點為中心，半徑五格之藍色外框近似圓，代表颱風範圍 (直徑約 850km)，以計算颱風內總水氣量。藍框至綠框的範圍內代表颱風外圍，以計算颱風外圍水氣。藍色網格代表颱風範圍邊界，以計算邊界上之輻合、水氣輻合。..... 50
- 圖 2-5：總水氣量個案，時間為 2009/08/04/00Z 至 2009/08/05/12Z，每組上圖皆為 EC-interim 的結果，下圖為 NCEP-CFSR 的結果。..... 51
- 圖 2-6：(a)、(b) 為所有個案總水氣量之最大值網格位置的累計。(c)、(d) 為所有個案總水氣量平均結果。縱軸與橫軸皆為距離中心的網格數。..... 52
- 圖 2-7 颱風水氣百分位圖，(a) 1994 年，為資料數最多的一年，共 554 筆，(b) 1999 年為資料數最少的一年，共 125 筆。..... 53
- 圖 3-1：颱風水氣與日尺度颱風外圍大氣溫度的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱風等級，(c) 中颱風等級，(d) 強颱風等級。..... 54
- 圖 3-2：颱風水氣與月尺度西北太平洋大氣溫度的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱風等級，(c) 中颱風等級，(d) 強颱風等級。..... 55
- 圖 3-3：區域分析：颱風水氣與西北太平洋平均大氣溫度的迴歸分析，(a) 相關係數，(b) 水氣增加率，(c) 颱風總水氣量。..... 56

圖 3-4：區域分析：颱風水氣和綜觀區域大氣溫度的迴歸分析，(a) 相關係數，(b) 水氣增加率。.....	57
圖 3-5：颱風水氣與季尺度西北太平洋大氣溫度的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱風等級，(c) 中颱風等級，(d) 強颱風等級。.....	58
圖 3-6：颱風水氣與日尺度颱風範圍海表面溫度的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱風等級，(c) 中颱風等級，(d) 強颱風等級。.....	59
圖 3-7：西北太平洋 1979-2009 年颱風季(6-10 月)總水氣量氣候場，灰色方框為主要研究範圍，(a) EC-interim，(b) NCEP-CFSR。.....	60
圖 3-8：(a) 西北太平洋水氣溫度年際變化，藍線是水氣，紅線是大氣溫度，灰線是水氣一個標準差，相關係數 0.41。(b) 西北太平洋水氣溫度迴歸分析，相關係數 0.40，迴歸直線斜率 1.72，水氣增加率 3.4 %/K。.....	61
圖 3-9：年際相減法結果。縱軸為颱風水氣增加率，橫軸為颱風水氣百分位組 (由小至大每組 10%)。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。(a) 為 EC-interim 結果，(b) 為 NCEP-CFSR 結果。.....	62
圖 3-10：年際相減法結果。縱軸為颱風水氣增加率，橫軸為颱風水氣百分位組 (由小至大每組 10%)。藍色為 EC-interim 結果，綠色為 NCEP-CFSR 結果，淺色代表未通過檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。(a) 為颱風(所有強度)結果，(b) 為弱颱風等級結果。.....	63
圖 3-11：西北太平洋總水氣量之颱風季氣候場，(a) MRI-AGCM 現今(1979-2003)，(b) MRI-AGCM 未來(2075-2099)，(c) EC-interim (1979-2009).....	64
圖 3-12：MRI-AGCM 西北太平洋季平均年際變化，藍線為總水氣量 (灰線為 1 個標準差)，紅線為大氣平均溫度，右上為相關係數，(a) 模式現在 1979-2003，(b) 模式未來 2075-2099。.....	65
圖 3-13：MRI-AGCM 西北太平洋年際相減迴歸分析，標題下由左至右依序為：水氣增加率、迴歸直線斜率、相關係數，(a) 模式現在(1979-2003)，(b) 模式未來(2075-2099)，(c) 模式未來現在差距(1979-2003, 2075-2099)。..	66
圖 3-14：所有颱風(所有強度)每年的個案資料數，藍線代表時間點數(time-steps)，綠線代表颱風數，(a) MRI-AGCM (1979-2003)，(b) MRI-AGCM (2075-2099).....	67
圖 3-15：所有颱風個案總水氣量平均結果，縱軸與橫軸皆為距離中心的網格數，方框示意颱風範圍，(a) MRI-AGCM (1979-2003)，(b) MRI-AGCM (2075-2099).....	67

- 圖 3-16：年際相減法結果。縱軸為颱風水氣增加率，橫軸為颱風水氣百分位組（由小至大每組 10%）。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。
(a) 為 MRI-AGCM (1979-2003)，(b) 為 MRI-AGCM (2075-2099)。..... 68
- 圖 3-17：年際相減法結果。縱軸為颱風水氣增加率，橫軸為颱風水氣百分位組（由小至大每組 10%）。三種顏色為模式現在 (1979-2003)、模式未來 (2075-2099)、未來現在差距(1979-2003, 2075-2099)，淺色代表未通過檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。(a) 為颱風(所有強度)，(b) 為弱颱風等級。 69
- 圖 4-1：第四章分析水氣輻合概念示意圖。第三章已分析大氣溫度對颱風水氣的影響，第四章將透過(1)颱風水氣輻合、(2)颱風外圍水氣、(3)颱風低層輻合三者和大氣溫度以及颱風水氣的關係，已了解大氣溫度如何透過水氣輻合改影響颱風水氣。大氣溫度又分為颱風外圍大氣日均溫，和西北太平洋月均溫，只與外圍水氣相關較高。..... 70
- 圖 4-2：颱風水氣輻合與日尺度颱風外圍大氣溫度的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱風等級，(c) 中颱風等級，(d) 強颱風等級。..... 71
- 圖 4-3：颱風水氣與颱風水氣輻合的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱風等級，(c) 中颱風等級，(d) 強颱風等級。..... 72
- 圖 4-4：颱風水氣和水氣輻合之年際相減迴歸分析。縱軸為颱風水氣增加率，代表每增加 100 單位(mm/s)的水氣輻合，颱風水氣增加的百分比，橫軸為颱風水氣百分位組（由小至大每組 10%）。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。..... 73
- 圖 4-5：颱風外圍水氣與颱風外圍大氣日均溫的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱風等級，(c) 中颱風等級，(d) 強颱風等級。..... 74
- 圖 4-6：颱風外圍水氣與西北太平洋大氣月均溫的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱風等級，(c) 中颱風等級，(d) 強颱風等級。..... 75
- 圖 4-7：颱風外圍水氣和西北太平洋大氣溫度之年際相減迴歸分析。縱軸為水氣增加率，橫軸為颱風水氣百分位組（由小至大每組 10%）。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。..... 76
- 圖 4-8：颱風水氣與颱風外圍水氣的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱風等級，(c) 中颱風等級，(d) 強颱風等級。..... 77
- 圖 4-9：颱風水氣和外圍水氣之年際相減迴歸分析。縱軸為水氣增加率，橫軸為颱風

	風水氣百分位組 (由小至大每組 10%)。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。.....	78
圖 4-10：	颱風水氣與颱風 850hPa 輻合的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱風等級，(c) 中颱風等級，(d) 強颱風等級。.....	79
圖 4-11：	颱風水氣和颱風低層輻合之年際相減迴歸分析。縱軸為水氣增加率，橫軸為颱風水氣百分位組 (由小至大每組 10%)。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。.....	80
圖 4-12：	颱風降水和颱風水氣迴歸分析，1998-2009 年，縱軸是 TRMM 雨量，橫軸是颱風水氣，(a) 颱風(所有強度)，(b) 弱颱風，(c) 中颱風，(d) 強颱風。.....	81
圖 4-13：	颱風降水和颱風水氣迴歸分析，1979-2009 年，縱軸是 EC-interim 模式雨量，橫軸是颱風水氣，(a) 颱風(所有強度)，(b) 弱颱風，(c) 中颱風，(d) 強颱風。.....	82
圖 4-14：	1979-2009 年颱風資料，縱軸為變數，橫軸為發展時間，左圖皆為資料點圖，而右圖將以 40 個發展時間前的資料作成機率密度函數(pdf)。(a)(b) 為颱風水氣，(c)(d) 為颱風外圍水氣，(e)(f) 為颱風大氣溫度，(g)(h) 為颱風近中心最大風速。.....	83
圖 4-15：	颱風水氣與西北太平洋月均溫的迴歸分析。縱軸是颱風水氣，橫軸為大氣溫度，標題下依序為水氣增加率、迴歸直線斜率、相關係數。五張圖從左上到右下依序為五組發展時間，每組皆有 8 個時間點的範圍(每個時間點 6hr，每組相當於 48hr)。.....	85
圖 4-16：	颱風水氣和西北太平洋大氣溫度的迴歸分析，縱軸為水氣增加率，橫軸為五組颱風發展時間，每組 8 個時間點(相當於 48 小時)。柱頂直線代表 2 個標準差範圍。.....	86
圖 5-1：	颱風水氣和大氣溫度之年際變化和趨勢。藍線為颱風水氣(灰線為一個標準差)，紅線為西北太平洋大氣溫度。右上角為兩者相關係數，標題粗體加底線者代表時間趨勢通過 90% 統計檢定。由上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。.....	87
圖 5-2：	颱風水氣趨勢。縱軸為水氣趨勢放大至百年的改變量，橫軸為颱風水氣百分位組 (由小至大每組 10%)。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過 90%信心水準統計檢定。.....	88

- 圖 5-3：颱風水氣和水氣輻合之年際變化和趨勢。藍線為颱風水氣(灰線為 1 個標準差)，綠線為颱風水氣輻合。右上角為兩者相關係數，標題粗體加底線者代表時間趨勢通過 90%統計檢定。由上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。..... 89
- 圖 5-4：颱風水氣輻合趨勢。縱軸為水氣輻合趨勢放大至百年的改變量，橫軸為颱風水氣百分位組 (由小至大每組 10%)。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過 90%信心水準統計檢定。..... 90
- 圖 5-5：颱風外圍水氣和大氣溫度之年際變化和趨勢。綠線為颱風外圍水氣(灰線為 1 個標準差)，紅線為西北太平洋大氣溫度。右上角為兩者相關係數，標題粗體加底線者代表時間趨勢通過 90% 統計檢定。由上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。..... 91
- 圖 5-6：颱風水氣和颱風外圍水氣之年際變化和趨勢。藍線為颱風水氣(灰線為 1 個標準差)，綠線為颱風外圍水氣。右上角為兩者相關係數，標題粗體加底線者代表時間趨勢通過 90% 統計檢定。由上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。..... 92
- 圖 5-7：颱風外圍水氣趨勢。縱軸為水氣趨勢放大至百年的改變量，橫軸為颱風水氣百分位組 (由小至大每組 10%)。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過 90%信心水準統計檢定。..... 93
- 圖 5-8：颱風水氣和颱風低層輻合之年際變化和趨勢。藍線為颱風水氣(灰線為 1 個標準差)，綠線為颱風 850hPa 輻合。右上角為兩者相關係數，標題粗體加底線者代表時間趨勢通過 90%統計檢定。由上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。..... 94
- 圖 5-9：颱風低層輻合趨勢。縱軸為輻合趨勢放大至百年的改變量，橫軸為颱風水氣百分位組 (由小至大每組 10%)。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過 90%信心水準統計檢定。..... 95
- 圖 5-10：颱風水氣和大氣溫度的迴歸分析年代際變化。縱軸是水氣增加率，橫軸是強度，其中強颱風包含所有強度，而五種顏色代表五個年代(有重疊)，而淺色代表未通過 95% 信心水準統計檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。(a) 日尺度颱風外圍大氣溫度，(b) 月尺度西北太平洋大氣溫度。..... 96
- 圖 5-11：颱風外圍水氣和大氣溫度的迴歸分析年代際變化。縱軸是水氣增加率，

橫軸是強度，其中強颱包含所有強度，而五種顏色代表五個年代(有重疊)，而淺色代表未通過 95% 信心水準統計檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。

(a) 日尺度颱風外圍大氣溫度， (b) 月尺度西北太平洋大氣溫度。 97

圖 5-12：颱風水氣和颱風水氣輻合的迴歸分析年代際變化。縱軸是水氣增加率，橫軸是強度，其中強颱包含所有強度，而五種顏色代表五個年代(有重疊)，而淺色代表未通過 95% 信心水準統計檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。 98

圖 5-13：(a) 颱風水氣和外圍水氣的迴歸分析年代際變化，(b) 颱風水氣和低層輻合的迴歸分析年代際變化。縱軸是水氣增加率，橫軸是強度，其中強颱包含所有強度，而五種顏色代表五個年代(有重疊)，而淺色代表未通過 95% 信心水準統計檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。 99

圖 6-1：颱風水氣與月尺度西北太平洋大氣溫度的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱等級，(c) 中颱等級，(d) 強颱等級。 100

圖 6-2：去掉極端溫度(兩個標準差)資料後，颱風水氣與月尺度西北太平洋大氣溫度的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱等級，(c) 中颱等級，(d) 強颱等級。 101



第一章 前言

身處氣候變遷的洪流之中，人們好奇未來何去，而研究者溯河而上，博古以通今。近年眾多研究已指出自 1970 年代以降全球表面溫度的突增現象，並與大氣中溫室氣體的濃度有密切關聯，並有研究進而指出人為工業、經濟活動的影響導致氣候變遷。在 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第四次氣候變遷評估報告中指出大氣的暖化趨勢，而此暖化的改變不僅影響全球性氣候，亦可能將衝擊台灣區域性氣候。近年來研究不斷指向可能導致劇烈天氣現象頻率增加、澇災旱災增加、海平面上升、以及對熱帶氣旋的影響等等。

台灣位於西北太平洋的熱帶邊緣，受颱風影響甚鉅，其降雨可以帶來用水，亦可能造成災害，所以氣候變遷如何影響颱風一直受到討論與關注，針對侵台颱風的活動亦有許多相關研究。全球暖化影響西北太平洋地區的海洋環境和大氣溫度、大氣環流等，可能進而改變颱風的數量、位置、強度、降水等等，由於颱風受到西北太平洋的多重時空尺度影響，氣候變遷與颱風活動關聯的研究，不僅是刻不容緩的重要議題，亦為艱難嚴峻的科學挑戰。

1.1 增溫效應和大氣水氣

水氣主宰降水、釋放潛熱、影響對流，是氣候運作非常重要的一環。研究指出 1988 到 2004 年間，衛星資料顯示海面上的總水氣量(Column Water Vapor，亦作可降水量 Precipitable Water)有明顯線性增加的趨勢，(Trenberth et al.,2005、IPCC, 2007)，每十年全球增加約 1.2%總水氣量(約 0.4 mm)，而就各地區域來看，大多為增加趨勢，西北太平洋增加尤為明顯，每十年增加最高可達 4%以上。研究亦發現水氣與海表面溫度關係密切，並推論長期大氣溫度上升，亦將導致大氣的總水氣

量上升。

從溫度與飽和水氣壓的熱力關係，可以計算暖化造成水氣增加的效益，亦即計算出氣溫每上升一度水氣最多可以增加多少。依據 Clausius-Clapeyron relation，飽和蒸汽壓隨溫度增加而上升的比率，可以計算出全球氣溫增加一度，水氣約增加 7%。此值隨背景溫度不同而改變，故不同環境其水氣增加率亦不相同，若溫度為 300K，則飽和水氣增加率約 6%/K，若為 200K，水氣增加率可為 15%/K。

Held and Soden (2006) 計算不同氣候模式中全球平均水氣和表面溫度，水氣增加率為 7.5%/K，此研究乃計算地表增溫的值，但水氣增加最多的地方並不是在表面，所以引來其他學者討論。然而，Trenberth et al. (2003) 早已指出在 700hPa 和 850hPa 處的全球水氣增加率較接近 7%/K，而且發現(氣柱積分)總水氣量(Column Water Vapor)與熱帶海表面溫度關係良好，其水氣增加率約為 9%/K。

O’Gorman 和 Muller (2009) 的研究顯示，計算模式平均的結果，全球表面每增溫一度，總水氣量約增加 7.3%，而地表比濕約增加 5.9%，並認為兩者差異，主要因為後者(海洋與地表的蒸發凝結作用)受表面能量的影響，比對流層的自由大氣來的緊密，所以與理想值差異較大 (Held and Soden, 2000、Schneider et al., 2010)，且地表的水氣又受到蒸發的限制，所以水氣增加率有不同的表現。

而且 O’Gorman 和 Muller (2009) 的結果發現以 500hPa 相對濕度計算於赤道區域有較高的增加率，尤其相較於副熱帶或中緯度溫度上升水氣反而有減少的比率，故由緯向平均總水氣量的水氣增加率，不管是相對於全球平均溫度或是緯向平均溫度，赤道地區皆為相對高值，水氣增加率超過 8%/K。

而由於溫度上升增加的水氣，往往又與全球暖化的降雨連結，Wentz et al. (2007) 研究了海溫、蒸發、降雨、大氣總水 (Total Column Water) 以及風速，在全球或熱帶海洋上的年際變化(1987-2006 年)，指出其中的關係密切，而全球海洋上的大氣總水於二十年間有增加的趨勢 (1.2 ± 0.4 % per decade)，。

Liu et al. (2009) 的研究中指出假使水氣增加率為 7%/K，劇烈降水應增加更多，

因為水氣凝結釋放的潛熱將回饋而有更多的降水。他們透過年際差異的研究結果得到，相對於全球平均溫度，在最高的降雨強度(90-100%)有最大的降雨增加率，約為 95 %/K。從以上可知溫度上升可使總水氣量增加，並對極端降雨有明顯的影響。但是，年際差異法受到聖嬰現象等年際變化現象的影響很大，能否將之解釋為溫度對雨量的影響或是擴大解釋為氣候變遷趨勢，仍有許多需要澄清之處。

1.2 氣候變遷與熱帶氣旋

由於觀測缺乏長期而可靠的全球資料，熱帶氣旋於氣候尺度上的改變，仍然存在許多的不確定性，是一科學上的挑戰。而關於氣候尺度上關於熱帶氣旋的研究，如聖嬰現象(ENSO)、大西洋年代震盪(AMO)、或是太平洋年代震盪(PDO)如何影響熱帶氣旋的數量、位置、路徑、強度等等，一直是研究上的熱門議題(Gray, 1984、Chan,1985、Chan and Shi,1996、 Goldenberg et al. ,2001)。

近年來全球暖化議題的關注，使得許多研究也投入熱帶氣旋的氣候變遷。Emanuel (2001) 從全球能量的觀點，認為全球暖化使熱帶海洋增溫，利於熱帶氣旋活動，熱帶氣旋將因此改變，而他概念性地提出熱帶氣旋扮演把低緯度能量帶往中緯度的角色，所以熱帶氣旋活動的增強相當於熱帶地區暖化的負回饋效應。

Emanuel (2005) 為了描述熱帶氣旋的活動狀況，將熱帶氣旋的強度對生命期作積分，定義為 PDI (Power destructiveness index)，並且得到 PDI 與海溫的良好關係，並且隨時間有增強趨勢，故推論暖化效應將使熱帶氣旋活動增強，但相關係數較高的結果只出現於大西洋，在西北太平洋的研究中，結果較不明顯。而 Webster et al. (2005) 的研究透過分析三十五年的熱帶氣旋，認為熱帶氣旋的強度增加，達到 Category 4 and 5 的比例上升，且發現於北太平洋和印度洋有此增加趨勢。

但是 Chan et al. (2004, 2006) 的研究分析過去四十多年(1960至2003年)的熱帶

氣旋，指出西北太平洋的強颱風數並無明顯年際趨勢，而是偏向年代際的震盪，並認為海溫與熱帶氣旋活動的相關主要來自聖嬰現象(ENSO)透過大氣所影響，並非暖化趨勢的改變。而 Kossin et al. (2007)認為儀器的更新使得量測基準不一，所以他利用降解析度將衛星資料標準化，再重新評估各海域熱帶氣旋的強度變化趨勢，結果發現只有西北太平洋有增強趨勢，其他地區的結果無法明顯變化。

由於觀測資料長度和處理的問題，有些研究以數值模擬的方式進行，而問題進而轉變成模式尺度和物理過程能否掌握熱帶氣旋的模擬。Oouchi et al. (2006) 利用高解析度(20km)全球大氣模式(MRI-CGCM)，探討暖化對熱帶氣旋強度和頻率的影響。經由模式未來海溫跟觀測海溫模擬，比較結果得知全球熱帶氣旋數目有減少的現象。但是其中以實際海溫模擬的結果，其熱帶氣旋數目仍與實際觀測有落差，高解析度模式的表現仍待改進。

而 Li et al.(2010)以高解析度(40km)的全球大氣模式(ECHAM5)，發現未來暖化的影響可能使熱帶氣旋的位置改變，由西太平洋往中太平洋移動，而其中也討論了全球暖化可能改變大氣垂直風切和邊界層的輻散，進而影響熱帶氣旋。

而針對眾多模擬結果與氣候變遷的結果，Knutson et al. (2010) 在回顧文章中整合研究結果，認為溫度上升將使全球熱帶氣旋增強，於 2100 年時強度增加 2-11%，而頻率減少 6-34%，而總水氣量的增加使近中心的降水增強約 20%。但模擬結果在大西洋較明顯，於西北太平洋的研究較不明確。

1.3 研究動機與論文架構

全球暖化是否能使熱帶氣旋擁有更多水氣？前文提到，許多研究分析暖化如何影響全球水氣，而更多研究氣候變遷下熱帶氣旋的改變，但是關於溫度增加，

熱帶氣旋中水氣將有何改變？此類的探討並不多，而西北太平洋地區颱風的水氣又將如何？不同強度的颱風是否有水氣增加率亦不同？為本文的研究目標。

熱帶氣旋的水氣大多仰賴投落送和衛星觀測，但直至近年衛星科技進步，才開始提供大量可靠的高解析度全球資料，而長期的資料是作氣候研究所必須的。Ortt (2004, 2007)利用 SSM/I 的資料研究大西洋的熱帶氣旋在不同強度、不同時期(增強期或衰弱期)有不同的水氣特徵，此研究使我們對熱帶氣旋的水氣更為了解。颱風水氣十分重要，不僅影響颱風的降雨，且經由潛熱釋放影響對流和颱風的強度。暖化的大氣如果影響颱風的水氣含量，可能進一步影響颱風的強度。但是吾人對於大氣溫度對颱風水氣的影響尚未有足夠的了解。

全球暖化的模擬結果顯示，熱帶氣旋可能帶來更多的降雨，或是洪災，因此即使是社會大眾，亦十分關心未來可能的改變。2009 年 8 月，莫拉克颱風(Morakot)造成台灣五十年來罕見的豪雨，雖然莫拉克僅為中度颱風(Category 2)，衛星資料顯示莫拉克颱風雨大尺度環境場夾帶豐富水氣(Hong et al., 2010)，帶來難以想像的雨量，洪患與土石流於南部山區，劃下難以撫平的傷痕。而颱風和氣候變遷的災害防治，亦因事件引起了台灣政府極高的重視，未來的劇烈天氣要如何應對，成為了人人關注的議題。

因此本研究希望探討溫度對颱風水氣的改變，透過年際差異與趨勢分析的方法，以總水氣量和對流層大氣溫度，計算颱風的水氣增加率，並分別討論不同強度的颱風會有什麼樣的差異，並且以水氣輻合的變化，試圖探討造成差異的可能因素，希望更進一步瞭解溫度增加對西北太平洋颱風的各種影響。本文架構如下：此第一章為前言，於後第二章說明使用的資料和研究方法，第三章分析颱風水氣和溫度的關係，並比較模式模擬未來的結果，第四章探討水氣輻合的影響，並於第五章討論颱風水氣的年際變化和趨勢，最後，第六章為綜合討論並結論。

第二章 資料分析與研究方法

2.1 使用資料介紹

(1) ERA-Interim

歐洲中長期天氣預報中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; ECMWF)所提供之長期全球再分析資料(ERA-Interim)，其資料起始時間為 1979 年 1 月 1 日迄今，時間解析度為每六小時一筆資料，空間解析度約為 75km ($0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$)，垂直以壓力座標分為 37 層：1000, 975, 950, 925, 900, 875, 850, 825, 800, 775, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 225, 200, 175, 150, 125, 100, 70, 50, 30, 20, 10, 7, 5, 3, 2, 1 百帕。本研究使用變數如下：總水氣量(Total Column Water Vapor; TCWV)、相對溼度、溫度、海表面溫度、地面氣壓、總降雨量等。選取分析時間為 1979 年到 2009 年的 6 至 10 月，大氣溫度資料垂直上使用 1000 至 200hPa，另外降水資料為模式預報，僅取 06, 12 時之第一預報時間資料。

(2) NECP-CFSR

美國國家環境預報中心(National Center for Environmental Prediction; NCEP)所提供之氣候預報系統再分析全球資料(Climate Forecast System Reanalysis; CFSR)，其資料起始時間為 1979 年 1 月至 2010 年 12 月，空間解析度為 30/50km ($0.3125^{\circ} / 0.5^{\circ}$)兩種，垂直共 37 層。本研究使用可降水量(Precipitable Water; PWAT，與 TCWV 相同)、溫度、表面溫度、地面氣壓等，選用時間為 1979 年到 2009 年的 6 至 10 月，大氣溫度資料垂直上使用 1000 至 200hPa。

(3) TRMM

美國太空總署所提供之熱帶降雨觀測計畫(Tropical Rainfall Measuring Mission; TRMM) 之衛星降水資料，為美、日合作之衛星利用微波頻道反演估計三小時累積降雨，起始時間為 1997 年 11 月 27 日迄今，每三小時一筆，為前後一個小時半之總累積降雨，空間範圍為南北緯 50 度以內，解析度為 25km(0.25°*0.25°)。本研究選用 1998 年到 2009 年的 6 至 10 月，並僅取 06 時的總降水量資料作分析。

(4) JTWC Best Track

熱帶氣旋的路徑採用聯合颱風警報中心(Joint Typhoon Warning Center; JTWC)所提供的西北太平洋地區，熱帶氣旋最佳路徑分析資料(Best Track)，每六小時一筆，包含中心位置、一分鐘平均最大風速等等，本研究使用 1979 年 6 月到 2009 年 10 月，最大風速大於 17(m/s)即熱帶風暴(Tropical Storm)等級以上之資料。



2.2 模式資料介紹與颱風偵測選取

(1) MRI-AGCM 模式介紹

以日本氣象廳(Japan Meteorological Agency; JMA)氣象研究所(Meteorological Research Institute; MRI)發展的高解析度大氣全球環流模式(MRI-AGCM)，模擬氣候推估未來。此模式採用時間切片(time-slicing)的實驗設計，模擬現在(1979-2003年)、近未來(2015-2039年)和 21 世紀末(2075-2099年)。在模擬未來氣候時，以大氣海洋環流耦合模式(CMIP3-AOGCMs)推估未來海溫(A1B)的上升幅度與該段時間內的線性變化趨勢，再加上現在海溫的年際變異，得到未來(如 2075-2099年)海溫變化，再以此合成的海溫驅動高解析度的大氣環流模式，推估未來之氣候變化。

模式每 6 小時提供一筆三維空間資料，包括風場、溫度場、濕度場、重力位

場等等，空間解析度為 TL 959，約 20km，垂直方向共 60 層。本研究僅取可降水量(Precipitable Water; PWAT)、溫度場資料，空間範圍為西北太平洋地區(10°N-30°N, 110°E-160°E)，溫度場垂直方向僅取四層(surface、850hPa、500hPa、200hPa)，選用現在(1979-2003 年)與 21 世紀末(2075-2099 年)時間切片的六到十月資料。

(2) 模式熱帶氣旋偵測

本研究利用模式資料偵測並追蹤熱帶氣旋的方法乃依據 Vitart et al. (1997, 2003)，並為了因應高解析度資料稍做修改：

- (a) 以 850hPa 渦度場之區域最大值處定義為渦度中心(須滿足 $> 10^{-4} s^{-1}$)。
- (b) 渦度中心 2°內，以海表面氣壓最小值處定義為暴風中心(梯度 $> 1hPa \text{ per } 4^{\circ}$)。
- (c) 暴風中心 2°內，需有(200+500hPa)溫度和之最大值(梯度須 $> 1K \text{ per } 4^{\circ}$)。
- (d) 暴風中心 2°內，需有(200-1000hPa)高度差之最大值(梯度須 $> 500m \text{ per } 4^{\circ}$)。
- (e) 熱帶氣旋 6 個小時(1 個 time-step)內不超過 400km 的距離。
- (f) 每一個熱帶氣旋，滿足風速大於 17.0m/s 以及(c)(d)暖心結構的資料數，皆需達 5 筆以上。

上述方法是基於熱帶氣旋結構所做的判斷依據，經過敏感度測試，可濾除非熱帶氣旋個案，對於熱帶氣旋能有不錯的掌握。

2.3 時空尺度與使用資料比較

(1)時空尺度與年際平均

本研究分析之時間尺度範圍為 1979 到 2009 年共 31 年，並只討論六至十月颱風頻繁的季節。主要研究變數是總水氣量(無論是 EC 的 TCWV(Total Column Water

Vapor)或是 NCEP 的 PWAT(Precipitable Water)，下文都稱作總水氣量)，以及海表面氣壓到 200hPa 的垂直積分平均溫度場，垂直積分過程考慮大氣質量。。

空間範圍為西北太平洋熱帶地區，達到熱帶風暴等級且暴風中心未登陸之颱風資料皆為研究對象。而溫度場選擇西北太平洋緯度 10-30⁰N、經度 110-160⁰E 這個範圍，乃因本研究討論之颱風(即熱帶氣旋)大多在此範圍(見圖 2-1)，故選擇此範圍作為大尺度平均的空間。

為了比較與討論年際變化的資料，以下介紹計算每年區域平均值的方法：其數值(index)是以每年颱風季五個月的資料，作區域平均和時間平均，得到每年一筆數值。以溫度數值為例：把溫度月平均資料先做海表面至 200hPa 垂直積分平均，再做區域平均(範圍 10-30⁰N,110-160⁰E，其中有考慮緯度差異對區域平均的影響)，並將陸地範圍資料剔除後，最後再作時間平均以得到每年一筆溫度資料，共 31 筆，代表颱風季西北太平洋對流層的大氣溫度，31 年的年際變化概況。

(2) 再分析資料比較

由於研究分析的時間尺度較長，而且空間尺度因應颱風尺度必須要有較高解析度的資料，綜合以上兩點，本研究選擇使用的資料為 EC-interim 與 NCEP-CFSR 的再分析資料(Reanalysis data)。以下為利用前段方法比較兩者資料的討論，並且配合其他資料作為參考依據。

以兩者資料，比較西北太平洋大尺度年際變化的同與異，首先，比較西北太平洋平均海表面溫度(如圖 2-2 (a))，其中 CFSR 是用表面氣溫(剔除陸地資料)代替海溫，結果顯示 interim 和 CFSR 的海表面溫度很接近，相關係數高達九成，但 CFSR 的升溫趨勢略高於 interim。

CFSR 線性趨勢較強的現象，在大氣平均溫度(200-1000hPa)的比較中更為明顯(見圖 2-2 (b))，而 interim 的升溫趨勢較不明顯，且 NCEP-R1 的線性趨勢更弱。在此討論的是對流層共同積分平均的溫度，而非只是表面溫度，而 interim 的資料

反映其對流層整體大氣的暖化趨勢並不明顯。

最後，平均總水氣量的年際變化結果顯示(見圖 2-2 (c))，interim 和 CFSR 的資料出現極大差異，相關僅有近六成，其主要差異來自 CFSR 在 1999 年與其之後的「躍遷」現象，此水氣的遽增是否為另一個氣候改變的現象？但在比較了 interim、NCEP-R1 和 SSM/I 的資料都無得到明顯的支持，在與自 NCEP 退休的潘華陸博士討論後，發現這應該是 NCEP-CFSR 在資料同化過程中因為加入微波衛星(AMSRE)後導致高、中層大氣之總水氣量遽增所致。

由於本研究主要分析溫度場和總水氣量的年際變異，CFSR 總水量資料有明顯瑕疵不適用，所以本研究採用 EC-interim 作為主要研究資料。

2.4 颱風之總水氣量定義與檢驗

本文選取的 1979 到 2009 年生成於六到十月的颱風資料，並且只考慮西北太平洋範圍(0-30⁰N, 100-180⁰E)內之颱風(最大風速達到 17 公尺每秒，包含弱颱風，亦即熱帶氣旋)。為了避免陸地對颱風水氣的複雜影響，當暴風中心登陸之後，該颱風的資料便不再計算。此方法所計算的每年颱風數目、時間點數(time-steps)如圖 2-3 所示，其中弱颱風時間點數遠比中颱風、強颱風來得多。

本研究計算颱風水氣多寡，乃獨立計算每一個時間點的總水氣量。每回計算首先皆找出最接近暴風中心的網格點，再來以此為中心展開半徑約為 400 公里的近似圓(如圖 2-4)，計算範圍內的所有網格總水氣量平均，得到本研究定義一個時間點之颱風總水氣量。但此近似圓之方法，不考慮完整圓的邊緣資料問題(以完整圓而言，邊緣面積的資料有些沒計算到、或多計算到)，是本研究定義方法之簡便而不周全所在。

另外，本研究計算颱風範圍，並不隨每個颱風個案而改變大小或形狀，因為有些颱風的水氣與周圍的環流結合(如大尺度的共伴作用)，為不規則變化，不易有規則地因應所有個案的狀況以調整範圍或形狀。於是本研究無分颱風強弱或類型，統一使用同樣平均範圍，但也可能因此疏漏而無法周全考慮一些水氣不規則或最大值出現在遠中心的個案。

由於範圍半徑約為 400 公里，配合資料解析度，interim 圓的直徑為 11 個網格點(約 8.25°)，CFSR 的直徑為 25 個網格點(約 7.8°)，若查看 2009 年這個強烈共伴效應且特殊的莫拉克颱風個案(見圖 2-5)，可以發現 interim 和 CFSR 的總水氣量因為不同反演過程而有許多差異，如總水氣量最大值的位置和數值不同，而 CFSR 的結果颱風眼乾燥區較大，且有些最大值位於遠中心在計算的範圍外。

但莫拉克較為特殊，當本研究以所有颱風個案檢驗方法，結果可以發現一定範圍內的水氣最大值，落在颱風中心附近網格點的頻率最高(見圖 2-6 (a)、(b))，而把所有分析的颱風時間點總水氣量平均之後(見圖 2-6 (c)、(d))，可以得知颱風水氣大致集中於中心附近，經過檢驗，本研究計算颱風總水氣量的方法可以合理使用。另外，比較此二者亦可看出 CFSR 的資料解析度較高，也呈現較高的高水氣的極大值，且較偏中心西南方。

2.5 簡單迴歸分析與年際相減迴歸分析

(1) 簡單迴歸分析

本研究於 31 年間共使用 615 個颱風資料，共九千多筆時間點的資料分析(其中弱颱四千多筆、中颱近三千筆、強颱一千多筆)。當颱風每個時間點的水氣值都計算後，與所有資料點對應的溫度值，兩者所有時間點資料直接彙整作簡單迴歸分析，即計算最小平方迴歸直線。

結果顯示其相關係數、迴歸直線斜率(mm/K)、和前者除以平均水氣值所得之水氣增加率(%/K)。水氣增加率為氣溫增加一度水氣增加的比率，也反應颱風得到水氣的效率，換句話說就是颱風水氣對溫度變動的敏感程度。

而在大尺度簡單迴歸分析被極端溫度控制，使迴歸直線的斜率有時出現偏離群體中心的情況，這在最後章節會對簡單迴歸分析作討論。

(2) 年際相減迴歸分析

將每年的所有時間點的水氣值都各自地依序排列之後，得到每年的颱風水氣百分位 (如圖 2-7)，再將水氣由多到寡分成十個百分位區間(percentile group)，各自平均，得到十筆資訊，分別代表該年颱風(由多到少)總水氣量的狀態。而我們可以選定一個百分位區間(例如 90-100%)的平均，分析 31 年間的年際變化。

而在進行迴歸分析時，參考 Liu et al. (2009)的方法，為了凸顯溫度年際差異帶來的影響，將 31 年的年際數值互相減去彼此，扣掉重複共有 465 筆(31*30/2)，作為年際相減迴歸分析。另外，Liu et al. 因為發現高溫於極端降水有相關較高的性質，故利用外差法推估水氣增加率，而本研究分析的颱風水氣量接近常態分布，故直接使用迴歸分析計算水氣增加率。

本研究主要分析資料為 EC-interim，因為 CFSR 的資料在 1999 年之後有明顯的躍升現象，在使用 CFSR 資料進行年際相減法時，將資料以 1999 年為界分為兩個區段：1979 到 1998 年、1999 到 2009 年，僅對區段內的年份相減，共得 245 筆相減資料再作迴歸分析。

使用年際相減法的特性是強調年際差距，對年際變化的特性有很好的發揮，但因為每筆年際的數值皆相同重要，多颱風年和寡颱風年的結果同地位，所以對於颱風較少的年份有放大的作用，反之亦然。最後，年際相減法增加資料的數目(31 筆增為 465 筆)，但實際上其資料因相減而成，失去其原本獨立性，故使用統計檢定時須多注意。

2.6 顯著性檢驗與蒙地卡羅法

(1) Student's T-Test

迴歸分析之檢定方式利用 Student's T-test。t-value = $\frac{S_x(\alpha - \alpha_0)}{S_{xy}/\sqrt{n-2}}$ ，其中 S_x 為 X 的標準差， S_{xy} 為 Y 對 X 的估計標準差， α 為迴歸係數(迴歸直線的斜率)， α_0 在虛無假設(X、Y 完全獨立)時為 0，n-2 為自由度。

本研究之年際迴歸分析雖然有 465 筆資料，但由於相減法會破壞獨立性，故計算 t-value 時，n=31，自由度為 29。在雙尾檢定下，t 值大於 2.05 時可通過 95% 信心檢定，則對應之相關係數(絕對值)需大於 0.35。另外，在時間趨勢的統計檢定時由於趨勢並不明顯所以只取 90% 統計檢定。

(2) 蒙地卡羅法

本研究利用蒙地卡羅法 (Monte-Carlo)，給予水氣增加率參考的誤差範圍。此法乃利用隨機性和大量的重複的計算以推估理想結果。在迴歸分析中，將年際相減得到的 465 筆差值隨機移除其中約 5% 的資料後，計算迴歸係數和水氣增加率，並重複計算一萬次，最後將一萬筆水氣增加率的值依序排列，取其前後各 2.5% 百分位的數值，作為 95% 信賴區間 (2 個標準差範圍)。

第三章 颱風的水氣與溫度

在這個章節，將從不同時空尺度和颱風強度討論颱風中的水氣和大氣溫度的關係。第一節先研究各尺度之簡單迴歸分析，第二節以年際相減迴歸分析，最後再利用氣候模式未來的結果作比較和探討。

研究對象為 1979-2009 年間颱風季所有的颱風 (包含弱颱，即熱帶氣旋(TC)，最大風速 17 m/s 以上)，並參考中央氣象局和 Saffir-Simpson Scale，將颱風以不同強度分類，分別為：弱颱等級(TS, 17-32 m/s)、中颱等級(TY(cate. 1+2), 33-50 m/s)、強颱等級(STY(cate. 3+4+5), >51m/s)。

3.1 颱風各尺度之迴歸分析

本節採用將所有時間點資料直接匯整的簡單迴歸分析，颱風水氣計算使用 6 小時一筆的資料，即日尺度(或時尺度，詳見第二章第四節)，而大氣溫度為海平面到 200 之垂直積分平均值 (詳見第二章第三節)。

而影響颱風水氣的溫度尺度，為本節研究之控制變因，以下主要討論三種尺度：第一小節分析日尺度溫度，第二、三小節研究月尺度溫度，以及第四小節研究季尺度溫度。

(1) 颱風水氣和日尺度溫度

此小節討論颱風水氣和颱風外圍溫度的迴歸分析，後者時間尺度為日尺度(每六小時一筆)，而平均大氣溫度的空間範圍為颱風外圍區域(如圖 2-3 所示)，之所以選用颱風外圍區域，是目標為環境溫度，且避免過多颱風潛熱作用。

結果顯示(見圖 3-1)，颱風的總水氣量與其外圍大氣日均溫相關良好，相關係

數約 0.64，而水氣增加率為 6.6 %/K。而當颱風強度增加，相關值或水氣增加率皆略為上升，強颱之相關值為 0.66，水氣增加率達 7 %/K，反觀弱颱等級時，有些低水氣量的個案使相關變差，其相關值為 0.58，水氣增加率不到 6 %/K。

而因為水氣和溫度研究的尺度相同，所以可能為彼此互相影響的結果，颱風外圍的溫度能使洋面水氣增加、使颱風有足夠能量輻合水氣，但另一方面，颱風形成過程不斷凝結水氣釋放潛熱、外圍下沉氣流增強，使環境大氣增溫，強颱亦可能因此正回饋作用才有較高的相關係數。

(2) 颱風水氣和西北太平洋之月尺度溫度

此小節分析颱風水氣，和西北太平洋(10-30⁰N,110-160⁰E)月平均大氣溫度的關係，結果顯示(見圖 3-2)，颱風的總水氣量和大氣月平均溫度相關係數約為 0.28，為弱相關，而水氣增加率約為 5.4%/K (± 0.08 ，95%信心區間)。

若依強度等級分成三組資料分析，比較結果弱颱的水氣和月尺度溫度相關程度最高，相關係數達 0.32，而水氣增加率為 5.8%/K (± 0.12)。相關值或水氣增加率都隨強度增加反而下降，強颱僅有 3.7 %/K，與日尺度溫度的結果相左。

以上顯示大尺度溫度場，最易影響弱颱水氣，兩者相關最高，這也暗示當颱風動力結構不強時，較依賴大氣溫度使水氣增加，而形成更有利颱風輻合水氣的環境，相關的討論在第四章有更多的結果。

(3) 颱風水氣和綜觀區域之月尺度溫度

在原本西北太平洋範圍之內，本研究再以經度 10 度、緯度 5 度的方形，切割出 19 個綜觀尺度的區域(如圖 2-1 所示，而西北的角落區域因為幾乎在陸地上，故不討論)，每個區域皆只討論範圍內的資料時間點(time-step)，最多有 862 筆，最少者僅 149 筆。而因為中、強颱於某些區域資料較少，故不分強度研究。

而在各區域颱風水氣和月尺度溫度的研究，本小節以下分成兩種溫度資料分

析討論：一種為西北太平洋之平均大氣溫度 (同前一小節)，目的是分析其結果的區域特性，後一種為颱風綜觀區域內的平均大氣溫度，為了分析較小空間尺度的相關。

第一，西北太平洋之大氣溫度平均，區域分析的結果發現 (見圖 3-3)，偏西偏北的相關係數較高，東南方的區域相關十分弱，而水氣增加率的結果也反映了這個特性，北邊區域的水氣隨溫度增加的比率較高，而且多在 6 %/K 以上。另外，偏北、偏西區域的颱風有較高的平均總水氣量，這代表這些地區的颱風可能發展時間較長而較為成熟，溫度和水氣也可能有不同的關係。

第二，綜觀區域之大氣溫度平均，結果發現幾乎所有區域的颱風水氣和區域月均溫皆有相關(見圖 3-4)，而且比上段的結果相關性都還高，大多高於 0.4，於南中國海和最東一系列的相關係數很高。而水氣增加率的高值亦明顯出現在最東一系列的結果，此外隨著緯度增加，水氣增加率有降低的微弱趨勢。

比較第一和第二種研究分法，第一種水氣增加率的高值主要出現在較北、較西的區域，也就是颱風比較接近成熟期的地方，這現象代表較大尺度的溫度和發展了較長時間的颱風相關較好，颱風經過時間越長，也就受到大尺度越久遠的影響 (更詳細分析於後第四章第三節)。而另外第二種結果，水氣增加主要反應在較東、較南方的區域，也就是接近颱風生成的區域，綜觀尺度的溫度影響颱風的形成與發展。

(4) 颱風水氣和西北太平洋之季尺度溫度

颱風水氣和西北太平洋季尺度大氣溫度(六至十月颱風季平均)的結果顯示 (見圖 3-5)，較長時間尺度的關係較弱，相關係數極低僅有 0.1，經比較，弱颱風的相關略高於中、強颱風。雖然此一結果顯示，西北太平洋的紀平均溫度的年際變化對颱風水氣量無明顯影響，但如果利用當年所有颱風的平均水氣量作年際迴歸分析，可以得到相關顯著的結果 (見下一節討論)。

(5) 颱風水氣和海溫結果

以上各種尺度研究的方法，亦可以海表面溫度代替平均大氣溫度作迴歸分析，但結果和大氣溫度不同，海溫所得的結果相關程度皆遠低於大氣溫度，唯有在颱風範圍日尺度的海溫和弱颱風的水氣，有微弱的相關（見圖 3-6），其餘結果皆無法通過統計檢定。這項結果顯示颱風水氣量多寡與周遭海表面溫度沒有一致性的統計關係，颱風水氣量的多寡並不決定於下墊面的溫度，颱風的動力作用可能更重要，此問題會在第六章有更多討論。

(6) 小結

透過分析各尺度大氣溫度和颱風水氣的關係，其中可以發現，太多的水氣增加率約於 7 %/K 上下，不同結果從 4 到 8 %/K 皆有。颱風水氣與越小尺度的大氣溫度關係越好，反之亦然。而小尺度的關係和強颱風關係較好，但是大尺度溫度和弱颱風相關較佳，水氣增加率也有同樣的現象。

3.2 年際相減之迴歸分析

前文將所有資料直接地作簡單迴歸分析，而這個章節，用了不同的分析方法，將更重視年際變化的影響，以年際相減法處理資料後作迴歸分析，重視每個年份間的差值(詳見第二章第 5 節)。以下第一小節為西北太平洋大尺度的分析，第二小節為 EC-interim 颱風結果，第三小節為 NCEP-CFSR 颱風結果，並比較兩者差異，最後第四小節為小結與討論。

(1) 西北太平洋之總水氣量與大氣溫度

在研究颱風前，先討論總水氣量與大氣溫度在西北太平洋的關係。總水氣量的氣候場顯示（見圖 3-7），西北太平洋水氣豐沛，暖池區域(Warm pool)的值大多高於 50 mm，最大值約在菲律賓附近。

年際變化結果顯示，西北太平洋之總水氣量和季平均大氣溫度有約四成的相關值（見圖 3-8 (a)）。而若把分析範圍擴大成整個熱帶區域(0-30°N, 100-180°E)，相關值將高達六成(0.62)，由此可見近赤道地區的總水氣量受到溫度明顯影響。

若以年際相減法計算，將差值作迴歸分析(如圖 3-8 (b))，得知西北太平洋的水氣增加率約為 3.4%/K (± 0.2)。表示若西北太平洋季平均大氣溫度提升，總水氣量亦會增加，雖然其值低於 C-C equation 的推估值(約 7%/K)。但對於颱風，西北太平洋水氣增加，不但使颱風可輻合的水氣增多，亦使環境更利於颱風發展，間接使颱風擁有更多水氣。

(2) 颱風水氣與西北太平洋大氣溫度(EC-interim)

每年颱風資料數眾多，所以把颱風水氣由小到大分成十個百分位組(percentile group，每組皆 10%)，研究水氣不同的颱風，當大尺度溫度上升時將有何反應。結果顯示，在颱風水氣高的時候，與溫度的相關係數較高(見表 3-1 (a))，水氣最高的四組有過統計檢定(90-100%的相關係數達 0.58)。強度分類的結果顯示，弱颱風的相關最好，70-100%三組的相關值皆超過 0.5，且弱颱風大多通過 95%信心水準統計檢定。而中颱風、強颱風等級的結果，相關係數都較低而難以通過檢定，由此可見，大尺度溫度主要影響弱颱風的水氣變化。

而迴歸分析的結果(見圖 3-9)，颱風(包含所有強度)的水氣增加率約在 2 至 4%/K 之間，最高的那組(90-100%)水氣增加率約 6.5 %/K。而弱颱風的水氣增加率明顯比其他都高，弱颱風多數約在 3 至 5 %/K 之間，而 90-100 %的水氣增加率約為 7 %/K，隨著弱颱風的水氣增加，水氣增加率亦有增加趨勢，換句話說，高水氣的弱颱風對大尺度溫度的反應更為敏感。

(3) 颱風水氣與西北太平洋大氣溫度 (NCEP-CFSR)

此段利用不同資料研究並比較，CFSR 資料同樣也支持颱風的水氣隨溫度增加而上升，而且其相關性整體而言較 EC-interim 略高(見表 3-1 (b))，與 EC-interim 不同於相關最高值並非出現於 90-100%，而是 70-80%那組。而從強度分類來看，弱颱風相關係數亦高於其他強度。但於中颱風或強颱風，CFSR 水氣和溫度的相關皆高於 EC-interim 的結果。

各百分位組所有颱風的水氣增加率約為 3 至 5 %/K 之間 (見圖 3-9 (b))，CFSR 與 EC-interim 比較，除了 90-100%，其餘百分位組的水氣增加率皆於 CFSR 較高，但每一百分位組的水氣變化值皆十分相近，不似 EC-interim 有百分位越高，水氣增加越明顯的趨勢。

NCEP-CFSR 在弱颱風的水氣增加率與 EC-interim 較為相似，皆有隨水氣增加而使水氣增加率上升的趨勢(約 6 %/K，於 90-100%)，只是 EC-interim 結果較明顯且值較高(見圖 3-10 (b))。

EC-interim 在中颱風、強颱風之水氣增加率皆很低，且中颱風的值有上升的趨勢(圖 3-9)。但 CFSR 的結果很不一樣，在中颱風、強颱風等級時，水氣增加率的值並不低(約 2 至 4 %/K)，不但沒有上升趨勢，於強颱風水氣增加反而值有下降的趨勢。此差異說明，EC-interim 和 NCEP-CFSR，於弱颱風的結果差異並不大，但中颱風、強颱風的結果差異卻很明顯，此差異的細節仍有待研究。

(4) 小結與討論

綜合前兩節結果，當西北太平洋暖化，其大尺度溫度場影響水氣場，進而影響颱風的總水氣量。當大尺度大氣溫度上升 1 度時，弱颱風的總水氣量增加約為 6%，而且分析後發現主要影響於弱颱風極端水氣狀況，90-100%的弱颱風水氣上升率約為 7%/K。而 CFSR 可以支持 EC-interim 在弱颱風等級的研究結果。此結果暗示暖化將

造成弱颱(熱帶風暴)的極端水氣增加，間接影響颱風強度和降水。

3.3 模式推估之未來颱風水氣研究

承前文，大尺度暖化效應將使颱風水氣增加。而以下將以 MRI-AGCM 模擬的資料作分析，試圖探討持續暖化下的西北太平洋水氣與颱風，於模擬中有甚麼變化？利用 MRI 模擬的兩個時間切片(現在 1979-2003 年和未來 2075-2099 年)，以下將分三小節分析討論：第一小節比較現今模擬與觀測結果，第二小節比較現在與未來差異、和從現在到未來的差距結果。

(1) 氣候模式和觀測資料比較

以下以 MRI 氣候模式現在(1979-2003)與 EC-interim 資料(1979-2009)討論，第一部分討論西北太平洋總體，第二部分討論颱風。

首先，分析西北太平洋的總水氣量 (見圖 3-11)，MRI 模式的氣候場相較於觀測資料水氣較高，總水氣量大約高估 7 mm 以上，且其南北向的水氣梯度亦較大。

西北太平洋年際變化結果顯示 (見圖 3-12)，平均總水氣量和大氣溫度相關極高(約 0.8)，遠高於觀測資料(約 0.4)，而水氣增加率為 7.2%/K (± 0.3)，亦遠高於觀測結果(3.4 %/K，見圖 3-13)，以上皆顯示模式高估大氣溫度對水氣的影響。

第二部分討論颱風，比較 MRI 模式和觀測資料發現，模式模擬的颱風數、時間點較少，而且模式過分高估中颱、強颱等級的比例(見圖 3-14 和圖 2-7(a)，及表 3-2)。由於水氣和強度高估，以致模式中的颱風平均總水氣量非常高 (見圖 3-15)，颱風的水氣梯度也明顯比觀測資料高得多。

迴歸分析的結果，模式颱風水氣和大氣溫度相關係數多在 0.3 到 0.7 之間，同

樣有高估的情形，尤其是中颱和強颱(見表 3-3 (a))。而且模式亦高估颱風水氣增加率(見圖 3-16(a)、圖 3-9(a))，中颱、強颱水氣增加率約為 6 至 12 %/K，遠大於觀測結果(0 至 4 %/K)。而弱颱水氣增加率的高值出現於 40-50 %，這也與觀測結果(90-100 %)不符。

總而言之，各項總水氣量的分析研究，模式資料相較於觀測資料都有明顯高估的現象，尤其是中颱和強颱。

(2) 現在氣候和未來氣候之水氣增加率

本小節比較 MRI 模式中現在和未來的結果，同樣地先討論西北太平洋總體情況，再討論颱風的部分。

西北太平洋的水氣於本世紀末將上升大約 15 mm，但水氣的分布形式變化不大(見圖 3-11)。但就西北太平洋水氣增加率而言(見圖 3-13)，模式未來的結果卻從 7.2 %/K 降為 5.3 %/K (± 0.3)，推測或許未來氣候中水氣雖然更多，但對溫度變動較不敏感。再者，若將未來和現在資料年際互減(兩者互減而非內部相減)，可得知氣候變遷，西北太平洋對流層大氣增加約 4 度，而水氣增加率約為 6.3 %/K (± 0.1)，換言之西北太平洋總水氣量上升約 25%。

接下來討論颱風，MRI 模擬在未來的颱風數目將減少，而強颱比例有增多的現象，符合 Knutson et al.(2010)的推估結果(見圖 2-7，及表 3-2)。而未來平均颱風的水氣將多於現在平均，增加近 20% (Cheng et al.，2011)，且梯度變化不大(見圖 3-14)。

而颱風水氣和大氣溫度的相關顯示(見表 3-3)，未來和現在的相關值兩者互有高低，颱風和弱颱於較高的百分位組的相關將略為增高，但中颱和強颱則無(模式未來的中、強颱數目過少故一起計算)。

而水氣增加率(見圖 3-17(a))，颱風除了在 90-100%於模式未來有明顯增加(增加約 3 %/K)，其餘百分位組差異不大。但進一步分析模式未來和現在年際互減的

結果，發現長時間的暖化，使得颱風的水氣增加率隨著水氣百分位組增加而上升，70-100%水氣增加率約為 10 %/K，換言之模式模擬 4K 暖化，颱風的極端水氣將增加 40%。

弱颱風在現在或未來的的水氣增加率很接近，無明顯變化（見 3-17(b)）。而模式中颱風和強颱風的水氣增加率，在水氣較低的百分位組，由 0-7 %/K 變成未來的 10-14 %/K（見 3-16），由此推論模式顯示未來中、強颱風水氣將於擁有更多水氣，因為水氣的低值將提升。

綜合以上，本研究透過比較未來與現在，以及分析未來現在差距的迴歸結果，弱颱風內的總水氣量和溫度的關係變化不大，而中颱風或強颱風於結果顯示，未來將因為溫度上升而擁有更多的水氣。



第四章 颱風的水氣輻合與其他

前一章節的研究顯示，大尺度溫度上升，能造成颱風中總水氣量的增加，而主要反映在弱颱風的部分，MRI 模式則是強颱風。所以針對颱風水氣的特性，本章節透過分析水氣輻合的角度以釐清其中的關係。

颱風如何取得水氣？主要的方式為水氣輻合，而影響水氣輻合者，在此又分為颱風外圍的水氣和颱風低層輻合。本章節將透過研究這三者(颱風水氣輻合、颱風外圍水氣、颱風低層輻合)和大氣溫度以及颱風水氣的關係 (見概念示意圖 4-1)，以企圖了解溫度上升如何使颱風擁有更多水氣。

本章節利用簡單迴歸分析以及年際相減迴歸分析的結果，第一節分析颱風水氣輻合，第二節將研究颱風外圍水氣，而第三節分析颱風低層輻合，最後研究其他颱風特性，第四節分析颱風降水量，第五節研究颱風發展時間的影響。

4.1 颱風水氣輻合的影響

關於水氣輻合量的定義，乃利用颱風範圍的四個邊(如圖 2-3 所示)，首先平均邊上水氣通量 (僅取垂直於邊長的方向)，再以向中心的平均通量為正，計算水氣輻合淨值量(輻合為正，輻散為負)。

首先分析颱風水氣輻合與外圍日尺度大氣溫度的關係，其相關值不高僅約兩成 (見圖 4-2)，而其中相關較好是強颱風(0.24)。再者，颱風水氣輻合和颱風水氣的相關很高，約在六成以上(見圖 4-3)，於三種強度的颱風分類上，相關係數和水氣增加率差異不大，於強颱風的相關值(0.7)及水氣增加率略高於其他二者。

而颱風水氣輻合依颱風水氣的順序排別，分成十個百分位組，並作年際相減迴歸分析，結果顯示相關性很高(見表 4-1)，平均而言，多為 0.6 以上。而水氣增

加率(%/100 unit)，其值代表颱風水氣輻合每增強 100 單位 (mm /s) 颱風水氣增加的百分比。結果顯示(見圖 4-4)，颱風水氣較多的百分位組水氣增加率低，反觀之，水氣少的颱風其水氣增加率較高，其值大多從 3 分佈至 6 % per 100 unit(水氣輻合)。而其中低、中水氣部分的弱颱風有最高的水氣增加率，但是在高水氣的部分強颱風受水氣輻合影響較為明顯。

4.2 颱風外圍水氣的影響

颱風外圍水氣的定義範圍如圖 2-3 所示，為外圍邊長約 1300 公里方型區域(減去颱風範圍)的總水氣量平均。以下透過外圍水氣跟大氣溫度以及颱風水氣的相關分析，試圖探討大氣溫度透過外圍水氣對颱風水氣的貢獻。

首先，分析大氣溫度對颱風外圍水氣的影響，颱風外圍日均溫與(颱風外圍)水氣的相關不錯(0.45)，而其中於弱颱風的關係最好，水氣增加率亦為最高(見圖 4-5)。而改變尺度，將溫度資料換作西北太平洋月尺度溫度後，雖然相關值非常低，結果也顯示弱颱風相關較好、水氣增加率較高的現象 (如圖 4-6)。

若以颱風外圍水氣和月尺度大氣溫度作年際相減迴歸分析，結果發現相關高值出現於水氣較多的弱颱風，相關值約 0.4，而中、強颱風相關不高，只有一組通過統計檢定 (見表 4-2)。此處相關與颱風水氣和大氣溫度的結果相近，不過相異者是，颱風外圍水氣和大氣溫度於各強度最低的幾組，有弱的負相關。

而颱風外圍的水氣增加率，有正有負，大多為 1 到 6 %/K (見圖 4-7)，結果顯著者為中高水氣的弱颱風，水氣增加率約為 5 %/K，而中強颱風較不顯著，可推論大尺度大氣溫度增加，弱颱風外圍的水氣增加較多，可供給弱颱風水氣輻合，而中、強颱風較低的結果可能與其利用外圍水氣的方式不同有關。

第二，分析颱風水氣和外圍水氣，從簡單迴歸分析（見圖 4-8），可以發現颱風水氣和颱風外圍水氣的相關很高，約六成，而其中弱颱風的相關值最高(0.78)，其水氣增加率亦為最高，約 0.7 (%/%)，即外圍每增加 1 %的總水氣量，弱颱風能增加 0.7 %的水氣，亦能代表外圍水氣被颱風利用的效率。

而颱風水氣和颱風外圍水氣的年際相減迴歸分析，也有同樣的結論，兩者相關性高，而且又以弱颱風最高，其各組相關值大多高於 0.7 (如表 4-3)。而颱風水氣增加率多在 0.3 到 0.8 (%/%)之間，而弱颱風的水氣增加率隨水氣增加而更高（見圖 4-9），尤其在高水氣的部分，弱颱風明顯比中、強颱風有較高的水氣轉換效率。綜合以上，溫度上升，颱風外圍水氣增加，而且進而使颱風水氣亦上升，尤其是中、高水氣的弱颱風。



4.3 颱風低層輻合的影響

關於颱風低層輻合的定義方法，與水氣輻合相同，只是水氣通量換成風場。由簡單迴歸分析（如圖 4-10），颱風水氣和輻合相關係數約為 0.4，而比較三種強度，相關最高者為強颱風(0.46)，對於輻合的水氣增加率亦為最高，在此水氣增加率定義為每增加一單位(1/s)之輻合量，而颱風水氣上升的百分比。

再以年際相減作迴歸分析，結果顯示颱風水氣和輻合相關性好（見表 4-4），其大多從 0.4 至 0.6 分佈，而相關高值出現在低水氣百分位組(10-50%)。比較不同強度，弱颱風的相關比中颱風、強颱風還高，此結果與簡單迴歸分析相左。

而年際相減的結果所示（如圖 4-11），水氣增加率最高值亦出現於低水氣百分位組(10-20%)，然後隨水氣百分位增加而減少，其值分佈約從 3 至 1 %。而比較不同強度的颱風，結果弱颱風於中、低水氣百分位組有較明顯增加的現象，只不過高

水氣的部分於強颱風較為明顯，此結果跟水氣輻合相近，弱颱風的中、低水氣值受水氣輻合、低層輻合影響明顯，但高水氣部分於強颱風較顯著。

綜合以上，可知颱風水氣受其水氣輻合影響，其中包含颱風外圍水氣和颱風低層輻合，而溫度上升影響颱風外圍水氣，在進而影響颱風水氣，這於中高水氣的弱颱風最為明顯，或許可以用以說明西北太平洋的大氣溫度為何和弱颱風關係最好。這現象推論或許跟弱颱風自身水氣輻合能力較弱，而仰賴大尺度環境的支援有關（環境水氣、溫度、以及輻合場），所以弱颱風的水氣和大氣溫度關係較好。

4.4 颱風水氣與降水分析

前三節主要針對水氣輻合相關討論，而此節將分析颱風水氣對颱風降水的影響。降水資料為日尺度資料(但一天僅為兩筆)，計算方法如颱風水氣的方法平均，本研究使用兩種資料，第一種 TRMM 的資料為衛星觀測資料，時間從 1998 到 2009 年共 12 年，而第二種為 EC-interim 的模式預報資料，時間 1979 到 2009 年，長度為 31 年，但模式的預報降水離觀測差距過大，僅作定性參考。

(1) TRMM 降水分析

結果顯示，颱風的總水氣量和降水呈現對數增加的關係(見圖 4-12)，在颱風總水氣量高時，降水亦增加極高，這也代表降水對於颱風水氣非常敏感，承接前文，大氣溫度上升而颱風水氣增加，可能進而使颱風降水亦急遽增加。

而颱風的相關係數高達 0.63，其中強颱風的相關係數、迴歸曲線的係數亦最高，代表強颱風將水氣轉為降水的效率最高，這與強颱風的對流較強有關。但如果細看弱

颶等級的結果，可以發現其水氣分布廣、降水也從極高到極低皆有的特性，比起來，中颶或強颶的降水較為單純，因此在颶風水氣或降水的議題上，弱颶較為複雜而特殊，而其重要性並不亞於強度較強的颶風。

(2) EC-interim 預報降水討論

預報降水的雨量值遠小於觀測資料(低了好幾倍)，故以下只就定性討論 (見圖 4-13)，首先如 TRMM 的結果，EC-interim 降水亦顯示其指數增加的特性，而在溫度較高的部分也出現了離群的極大降水值。但若從強度分類來看，不難發現模式預報降水低估了弱颶等級的降水，偏高的離群值遠少於中颶、強颶等級的降水，意即弱颶無法產生大降水。模式預報對此還有待改進，需增加弱颶劇烈降雨的可能。



4.5 颶風水氣增加率與發展時間

回到西北太平洋颶風水氣與大氣溫度相關分析，這次研究將考慮發展時間的因素，所謂發展時間，定義為最大風速資料達到熱帶風暴等級(17 m/s)後之時間點的累計，舉例來說，若一個颶風達到弱颶等級之後到了第 4 個時間點(24 小時)，則發展時間為第 4 個單位時間。

如此每個時間點的資料皆代表颶風某個發展時間的狀態。因此即瞭解西北太平洋颶風的發展情況，如颶風的總水氣量、颶風外圍水氣、颶風內大氣溫度、最大風速等(見圖 4-14)。結果所示颶風的總水氣量隨發展時間而增加，在達 30 個發展時間之後資料數開始減少，達 40 個發展時間後資料數劇減且分佈紛雜。颶風內大氣溫度也有相似的結果，因為颶風發展釋放潛熱而使溫度增加，增強暖心結構，

且同樣地達 40 個發展時間後資料數銳減，除了颱風消散也因為中心登陸而不再計算之故，以下研究只分析第 40 個時間前的資料。

進一步將發展時間分組研究，以每 8 個發展時間為一組(相當於 48 小時)，共 5 組(第一組為第 1-8 個、第二組第 9-16 個，以此類推)，將每組分別以颱風水氣和月尺度大氣溫度，作簡單迴歸分析(見圖 4-15、圖 4-16)，結果顯示前三組(相當於前六天)的型態較為接近，相關係數約在三成以下，水氣增加率略小於 5，而後兩組(七至十天)的相關值較高(第五組達 0.46)，水氣增加率也明顯提升，分別為 6.6 和 10.6 %/K。

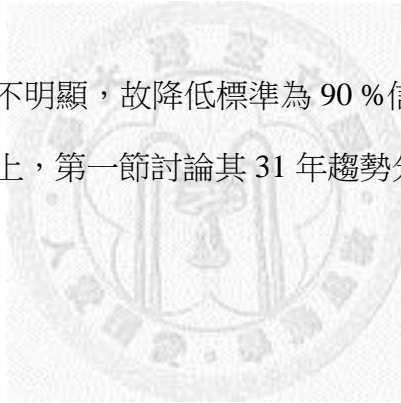
結果顯示後期之颱風較明顯受大尺度大氣溫度的影響，以下有兩種推論可能：第一種是因為後期消散中的颱風占較多比例，或許較為依賴大環境的溫度與水氣，以保有或維持颱風水氣，但若背景場較低溫時，大環境較缺乏水氣，晚期消散中的颱風將無法維持而迅速失去水氣。而另一個可能原因是，較後期的颱風受到大尺度溫度較長時間的影響，故其水氣和大尺度溫度關係較高，更能反應西北太平洋大尺度的狀態，也就是說，在大尺度有利環境下，生命期較長的颱風與大尺度環境關係較佳。

第五章 颱風之時間趨勢和年代際變化

前兩個章節利用年際差值作迴歸分析，以計算大氣溫度每改變一度，颱風水氣及其相關的變化比率，而研究其中包含兩個部分：年際變化和時間趨勢，前者和聖嬰現象關係明顯，後者和氣候變遷有關。

而這個章節將把重心放在探討時間趨勢，而這兩種不同方法的結果並不一定會一致，主要因為西北太平洋對流層大氣增溫的趨勢並不明顯 (如圖 3-8 所示)，EC-interim 資料 1979 到 2009 年颱風季的結果顯示，31 年來增加約 0.2 度，且未通過 90 % 信心水準統計檢定。而同樣地，西北太平洋總水氣量增加的趨勢更不明顯，31 年僅增加約 0.3 %。

此章節因時間趨勢較不明顯，故降低標準為 90 % 信心水準，而本研究繼續把焦點放在颱風相關的變數上，第一節討論其 31 年趨勢分析，而第二節將討論迴歸分析的年代際變化。



5.1 颱風趨勢分析

以下將會討論西北太平洋颱風的 31 年趨勢，而除了水氣相關的趨勢以外，也以其他變數趨勢，討論造成颱風水氣改變的可能因素。以下每小節首先會討論全部平均(0-100%)，並取明顯的部分趨勢深入討論(弱颱風、中颱風高水氣(70-100%)、強颱風的低水氣(0-30%))，而後細分成 10 個百分位組來分別討論。第一小節討論颱風水氣，第二小節討論水氣輻合，第三、四小節分別討論颱風外圍水氣和低層輻合。

(1) 颱風水氣趨勢

整體而言，颱風水氣有些微減少的趨勢(未過統計檢定)，而其中弱颱風隨時間而

增加水氣(見圖 5-1)，其中高水氣(70-100 %)的弱颱風平均可以通過檢定，並與西北太平洋大氣溫度有相關(相關值約 0.5)，故此推論大氣溫度在趨勢上能夠影響弱颱風的高水氣。而相對地，中颱風(70-100 %)和強颱風(0-30 %)水氣有隨時間減少的顯著趨勢，但是颱風水氣與大氣溫度的相關很低。

若觀察颱風 10 個百分位的結果 (如圖 5-2)，弱颱風在高水氣百分位有增加的趨勢，31 年大約上升 3 %。而中颱風和強颱風各在高、低水氣百分位有減少的趨勢，而且其減少的趨勢比弱颱風增加的還強，減少約 3 到 6 %。

(2) 颱風水氣輻合趨勢

由年際變化的結果發現 (見圖 5-3)，弱颱風(70-100 %)水氣輻合有明顯上升趨勢，且和弱颱風水氣有高相關，約為 0.6，而另一方面，強颱風(0-30 %)水氣輻合有明顯的下降，並且也與颱風水氣(減少趨勢)有很高的相關，相關值高達 0.8。

再細看不同水氣百分位的結果 (見圖 5-4)，弱颱風的水氣輻合於中、高百分位有明顯上升趨勢，而強颱風於中低百分位有水氣輻合減少的時間趨勢，且強颱風的變化量亦比弱颱風略大。以上結果與颱風水氣的趨勢十分相似，故由此可推論，颱風水氣增減的趨勢乃因颱風輻合的變化所致。

(3) 颱風外圍水氣趨勢

總體而言，颱風的外圍總水氣量有減少的趨勢 (見圖 5-5 和 5-6)，而此現象主要出現於中颱風和強颱風，而且外圍水氣和颱風水氣的相關值很高(0.8)，但和大氣溫度相關很低。與大氣溫度有相關的是弱颱風的外圍水氣，但其時間趨勢不明顯。

颱風不同水氣百分位的結果顯示(如圖 5-7)，所有強度的颱風大致上為外圍水氣下降的趨勢，而最明顯下降趨勢為強颱風的低水氣部分，減少趨勢可達 10 %。

(4) 颱風低層輻合趨勢

整體而言，颱風隨時間低層輻合有增加的趨勢（如圖 5-8），此增加趨勢明顯反應在弱颱風和中颱風上，而看部分颱風都有顯著的變化趨勢，弱颱風(70-100%)和中颱風(70-100%)都有增加的趨勢，而強颱風(0-30%)有減少的趨勢，但是只有弱颱風和強颱風於低層輻合和颱風水氣有顯著的相關(約 0.5)。

而分析 10 個颱風水氣百分位（如圖 5-9），可以得知中高水氣量的弱颱風其低層輻合的量有顯著增加的趨勢，此或許能與其水氣輻合的增強趨勢連結，說明弱颱風水氣隨時間增加的現象。而另外中颱風、強颱風的趨勢皆少有顯著，細分成十個百分位沒有明顯一致的結果。

(5) 小結

綜合以上，從 31 年的趨勢我們可以得知，弱颱風的水氣高值有上升的趨勢，而且低層輻合和水氣輻合有一致的趨勢，只不過其相關並不高。而另一方面，強颱風的水氣有下降的趨勢，或許乃因外圍環境水氣減少，而使強颱風水氣輻合變弱(有顯著相關)。而中颱風的輻合有增強的趨勢，但外圍水氣有下降的趨勢，使中颱風水氣輻合的變化不一致，變化介於弱颱風和強颱風之間。

另外弱颱風的水氣變化，從年際的結果而言，將歸因於外圍水氣，但從趨勢分析來看，而與低層輻合一致，其中的差異將會再延伸討論再說明。

5.2 迴歸分析的年代際變化

在第三章和第四章利用簡單迴歸分析，計算水氣增加率，以了解各強度颱風轉化水氣的效率。此節將 31 年資料分成五個年代(1979-1989、1985-1994、1990-1999、1995-2004、2000-2009)，其中有些年份重疊。而各別以五組年代資料作迴歸分析，

其中資料數最低為 400 筆以上(強颱風)，有些超過 1000 筆(弱颱風)。

本節將比較颱風水氣增加率於年代際的變化，第一小節討論颱風水氣與大氣溫度，第二小節討論水氣輻合，第三小節為外圍水氣，第四小節為低層輻合，並於最後討論年代際的結果。

(1) 颱風水氣與大氣溫度

年代際迴歸分析結果所示 (見圖 5-10)，颱風外圍日尺度大氣溫度對水氣增加率無年代際的變化，僅反映強颱風水氣增加率較高的現象。而年代際變化出現於颱風水氣和月尺度大氣溫度，其中可見弱颱風的水氣增加率有隨時間增加的趨勢，而強颱風反而有隨時間減少的趨勢，這個結果和年際變化中弱颱風水氣增加、強颱風水氣減少的現象相符合。



(2) 颱風水氣與水氣輻合

而相對於水氣輻合的水氣增加率，其年代際變化不明顯 (見圖 5-12)，強颱風的值較高，弱颱風較低，而弱颱風的水氣增加率略有增加的趨勢，或許與弱颱風水氣增加有關，另外，中颱風則有下降的微弱趨勢。

(3) 颱風水氣、外圍水氣與大氣溫度

首先看颱風外圍水氣與大氣溫度的迴歸分析，無論是日尺度或月尺度大氣溫度的結果，其年代際的變化趨勢皆不太顯著 (見圖 5-11)，弱颱風和中颱風於月尺度大氣溫度的外圍水氣增加率，略有上升的變化。

而颱風水氣和外圍水氣的迴歸分析結果，年代際變化只出現於強颱風 (如圖 5-13 (a))，強颱風的颱風水氣增加率，有隨時間增加的趨勢，可見強颱風利用外圍水氣的效率增加，又或者說是強颱風的水氣更敏感且更依賴外圍水氣。

(4) 颱風水氣與低層輻合

低層輻合的結果顯示 (如圖 5-14 (b))，弱颱風和強颱風的水氣增加率有隨時間增加的趨勢，而強颱風尤為明顯，此說明強颱風利用低層輻合而使自身水氣增加的比率增加，而另一方面，弱颱風低層輻合於年際上有增加趨勢。

(5) 小結與討論

水氣增加率代表颱風得到水氣的效率，透過年代際變化的研究，可以發現弱颱風水氣增加率有增加的現象，此與颱風水氣年增加趨勢相符。推論弱颱風，因為大氣溫度上升，低層輻合也增強，以及弱颱風轉換水氣的效率變強，使弱颱風的水氣輻合變強，水氣有增加的趨勢。

而強颱風的水氣增加率有減少的現象，代表大氣溫度使強颱風水氣增加的效益減弱，此亦與強颱風水氣減少的 31 年趨勢相符。而強颱風的低水氣部分，外圍水氣和低層輻合有減少的年趨勢，又加上強颱風水氣年代際上更為依賴外圍水氣、低層輻合，故強颱風的水氣輻合減弱，而使總水氣量下降。

第六章 結論與討論

6.1 結論

為了探討大氣溫度上升對颱風水氣的影響，本研究以各種迴歸分析和趨勢分析的方法，並利用水氣輻合作為中介點的角度，研究西北太平洋各尺度的對流層溫度，如何使颱風的總水氣量造成改變。結論分點敘述如下：

(1) 大尺度增溫使弱颱風的極端水氣增加

從各尺度的迴歸分析可發現，當大氣溫度的尺度越大，弱颱風的特性就越能顯現，弱颱風水氣與大尺度溫度的相關較好，水氣增加率也較高。西北太平洋月均溫上升一度，弱颱風水氣約增加 6%，而且從年際相減迴歸分析的結果發現，溫度主要影響的是弱颱風的水氣高值，西北太平洋大氣增溫一度，將使弱颱風的極端水氣(90-100%)增加約 7%。

但相對地，大氣溫度的尺度越大，和強颱風的關係就越差，其水氣增加率也就越低，而年際的結果西北太平洋平均大氣溫度與強颱風無相關，這代表研究沒有得到大尺度年際溫度跟強颱風水氣之間的明確關係，而強颱風與尺度較小的大氣溫度相關明顯較好。

(2) 環境水氣增強致使弱颱風水氣增加

為了分析為什麼弱颱風水氣對於大尺度溫度較為敏感，又或者為什麼弱颱風水氣增加的效率較高，本研究以水氣輻合，作為大氣溫度與颱風水氣之間的中介關係。而年際相減迴歸分析的結果發現，大尺度溫度上升，使弱颱風外圍水氣增加得較多，而且外圍水氣和大氣溫度，皆於高水氣的弱颱風有一致的增加效率。

換而言之，本研究認為年際上若西北太平洋大氣溫度上升，將提供一個較好的環境水氣，進而使弱颱風得到水氣的效率較高，故弱颱風水氣增加，其中推論因為弱颱風最需要環境的支持，此與水氣的轉換、利用方式有關。

(3) 弱颱風有水氣增加的趨勢

從 31 年的變化中可以看出弱颱風的高水氣有增加的趨勢，從年趨勢和年代際的結果來看，弱颱風的輻合以及低層輻合增加水氣的效率都有增加趨勢，而且高水氣的弱颱風其水氣輻合也有增加的趨勢，故從趨勢分析推論，弱颱風乃透過低層輻合增強使水氣有增加的趨勢，不過其相關並不高。

(4) 強颱風有水氣減少的趨勢

強颱風雖然年際上的結果和大氣溫度無明顯相關，但從趨勢分析顯示，強颱風低水氣有顯著減少的趨勢。而且低水氣的強颱風，其外圍水氣和水氣輻合有顯著減少的趨勢，而且和強颱風水氣的相關很高，並加上年代際上強颱風對外圍水氣更為依賴，所以推論外圍水氣的改變導致水氣輻合趨勢下降，進而使強颱風的水氣減少。

(5) MRI-AGCM 模式中未來的強颱風水氣增加率上升

MRI-AGCM 模式對於中颱風、強颱風有明顯高估的現象，此現象亦同樣發生於颱風水氣和水氣增加率。而從年際相減迴歸分析可以發現，本世紀末的強颱風低水氣值部分(0-30%)，水氣增加率明顯上升，進而推估未來強颱風總水氣量增加，而水氣值低的情況將會減少。

6.2 延伸討論

颱風是西北太平洋上變幻莫測的劇烈天氣現象，受到多重尺度大氣和海洋的影響，並透過颱風特殊機制的運作，顯得神祕而敏感。本研究主要利用大氣溫度、颱風水氣、和水氣輻合相關變數的分析，試圖了解颱風運作的部分特性，而關於颱風的研究，確實仍需要更多長期而精確的資料，並透過模擬研究，才能對颱風的生成和活動有更多的認識或掌握。

本研究的結果較能確定弱颱風的特性，其年際變化和時間趨勢的結果較為一致，而兩者於強颱風水氣的研究有分析的現象，這個分歧的結果除了本身探討的東西不同(年際變化可能和聖嬰現象較相關，而時間趨勢則指向氣候變遷)，使用資料於西北太平洋平均對流層溫度，31 年間增溫的現象並不顯著，所以有時間趨勢和水氣增加率不同的狀況。而近年來由於衛星科技的進步，颱風水氣有較精確的資料，但早期的衛星難以得到颱風區域的精確資料，且再分析資料的合成與處理方式，也可能會對研究結果有很大的差異。期待未來更多精確的資料和更周全的模式，能帶給颱風更好的研究。

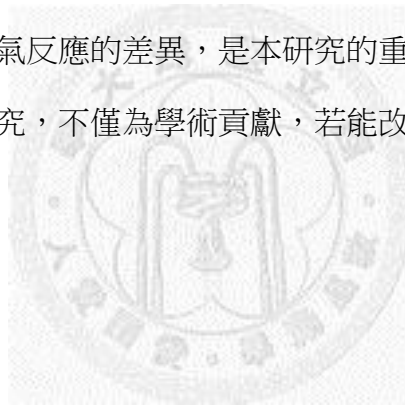
而本研究由於研究整層大氣的水氣，故對應使用整層大氣溫度，但其實中上對流層的水氣稀薄，故高估了中上層大氣溫度的影響，在研究初期亦針對各層溫度、各層水氣作測試，結果在低層(900hPa 附近)與中層(500hPa 附近)溫度和水氣有較高的相關，之所以於這兩層較佳，推測前者是海面上向上蒸發的水氣，而後者是旺盛對流將凝結的液態水往上傳送後，再次蒸發成水氣的結果。而本研究亦測試過加入登陸後的資料或者加入中緯度(30-45°N)的資料，基本上結果不會差異太大，只不過使相關稍微下降，而只研究熱帶未登陸的資料是為了將目標簡化。

另外，本研究大量使用線性迴歸的方法，利用其斜率計算水氣增加率，但最小平方方法的結果可能受極端值控制，某些線性較差的研究對象其迴歸直線有時不能良好地代表大多情況。以颱風水氣和月均溫大氣的簡單迴歸分析為例(如圖 6-1)，溫度在 262.5 度以上，颱風水氣的分佈有一分歧的現象(有隨溫度增加水氣向上者，但也有隨溫度增加反而水氣下降者)，這推測可能是因為溫度太高反而大量成雲降

水消耗水氣的負回饋效應，而在去除掉溫度極值(兩倍標準差)的樣本後，發現在中
颶強颶的結果，相關係數上升，而水氣增加率也增加 (見圖 6-2)。以上說明本研
究的統計方法可能有未盡之處，尤其在中強颶的部分。

本研究利用海表面資料時無法得到顯著相關的結果，可能代表颶風的水氣和
颶風大氣動力機制(如低層輻合、對流凝結)有較緊密的關係，但本研究多於簡單而
概括性的定義下分析，而期待未來有更全面更精確的方法研究海溫對颶風水氣影
響。而另一個延伸問題是，本研究多從大尺度的分析平均下的狀況，但實際西北
太平洋地區，大氣溫度以及水氣或輻合等，於颶風複雜的系統內究竟如何運作，
還有待進一步釐清，或許需以模式模擬探討。而研究起點 **C-C relation** 的理論又能
對颶風水氣有多少貢獻，為一個困難的問題。

最後，弱颶和強颶水氣反應的差異，是本研究的重點，期待未來有更多關於
大氣溫度對颶風水氣的研究，不僅為學術貢獻，若能改善颶風預報，亦是全人類
的福祉。



參考文獻

陳淡榮、鄭兆尊、林宜穎、陳永明、陳正達、M. Sugi，2011：以 MRI-AGCM 推估未來臺灣地區颱風降雨的變遷。建國百年天氣分析預報與地震測報研討會。

- Allen, R. P. and B. J. Soden, 2008: Atmospheric Warming and the Amplification of Precipitation Extremes. *Science*, **321**, 1481-1484.
- Cady-Pereira, K. E., M. W. Shephard, D.D. Turner, E. J. Mlawer, S. A. Clough, and T. J. Wagner, 2008: Improved Daytime Column-Integrated Precipitable Water Vapor from Vaisala Radiosonde Humidity Sensors. *J. A. & O. Tech.*, **25**, 873-883
- Camargo, S. J. and A. H. Sobel, 2004: Western North Pacific Tropical Cyclone Intensity and ENSO. *J. Climate*, **18**, 2996-3006.
- Chan, J. C. L., K. S. Liu, 2004: Global Warming and Western North Pacific Typhoon Activity from an Observational Perspective. *J. Climate*, **17**, 4590-4602.
- Chan, J. C. L., 2006: Comment on "Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment". *Science*, **311**, 1713b
- Elsner, J. B., J. P. Kossin and T. H. Jagger, 2008: The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature*, **455**, 92-95.
- Emanuel, K., 2005: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, **436**, 686-688.
- Emanuel, K., 2007: Environmental Factors Affecting Tropical Cyclone Power Dissipation. *J. Climate*, **20**, 4597-5509.
- Held, I. M. and B. J. Soden, 2000: Water Vapor Feedback and Global Warming. *Energy Environ.*, **25**, 441-475.
- Held, I. M. and B. J. Soden, 2006: Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming. *J. climate*, **19**, 5686-5699.
- Knutson T. R., J. L. McBride, J. Chan, K. Emanuel, G. Holland, C. Landsea, I. Held, J. P. Kossin, A. K. Srivastava, and M. Sugi, 2010: Tropical Cyclones and Climate Change. *Nature Geoscience*, **3**, 157 - 163.
- Kossin, J. P. , K. R. Knapp, D. J. Vimont, R. J. Murnane, and B. A. Harper: A globally

- consistent reanalysis of hurricane variability and trends. *G. R. L.*, 34, L04815.
- Li, T., M. H. Kwon, M. Zhao, J.-S. Kug, J.-J. Luo, and W. Yu, 2010: Global warming shifts Pacific tropical cyclone location. *G. R. L.*, **37**, L21804.
- Liu S. C., C. Fu, C.-J. Shiu, J.-P. Chen, and F. Wu, 2009: Temperature dependence of global precipitation extremes. *G. R. L.*, **36**, L17702.
- Liu, P., Y. Kajikawa, B. Wang, A. Kitoh, T. Yasunari, T. Li, H. Annamalai, X. Fu, K. Kikuchi, R. Mizuta, K. Rajendran, D. E. Waliser, and D. Kim: Tropical Intraseasonal Variability in the MRI-20km60L AGCM. *J. Climate*, **22**, 2006–2022.
- Murakami, H., B. Wang and A. Kitoh, 2011: Future changes in the western North Pacific typhoons: Projection with a 20-km-mesh global atmospheric model. *J. Climate*, **24**, 1154-1169.
- O’Gorman, P. A. and C. J. Muller, 2010: How closely do changes in surface and column water vapor follow Clausius-Clapeyron scaling in climate change simulations? *Environ. Res. Lett.*, **5**, 025207.
- Oouchi, K., J. Yoshimura, H. Yoshimura, R. Mizuta, S. Kusunoki and A. Noda, 2006: Tropical Cyclone Climatology in a Global-Warming Climate as Simulated in a 20 km-Mesh Global Atmospheric Model: Frequency and Wind Intensity Analysis. *J. Meteor. Society. Japan*, **84**, 259-276
- Ortt, Derek: 2007 Effects of Environmental Water Vapor on Tropical Cyclone Structure and Intensity. *Open Access Theses*, Paper 90.
- Ross, R. J and W. P. Elliott, 2000: Radiosonde-Based Northern Hemisphere Tropospheric Water Vapor Trends. *J. Climate*, **14**, 1602–1612.
- Schneider, E. K., B. P. Kirtman, and R. S. Lindzen: 1999: Tropospheric Water Vapor and Climate Sensitivity. *J. Climate Atm. Sci.*, **56**, 1649-1658.
- Seager, R., N. Naik, G. A. Vecchi, 2010: Thermodynamic and Dynamic Mechanisms for Large-Scale Changes in the Hydrological Cycle in Response to Global Warming. *J. Climate*, **23**, 4651–4668.
- Sohn B. J., and S.-C. Park, 2010: Strengthened tropical circulations in past three decades inferred from water vapor transport. *J. G. R.*, **115**, D15112
- Stowasser, M., Y. Wang, and K. Hamilton, 2006: Tropical Cyclone Changes in the Western North Pacific in a Global Warming Scenario. *J. Climate*, **20**, 2378–2396.
- Sugi, M., H. Murakami, and J. Yoshimura, 2009: A Reduction in Global Tropical

- Cyclone Frequency due to Global Warming. *SOLA*, **5**, 164-167
- Trenberth, K. T., A. Dai, R. M. Rasmussen, and D. B. Parsons, 2003: The Changing Character of Precipitation. *Bulletin. A. M. S.*, **84**, 1205–1161.
- Trenberth, K., 2005: Uncertainty in Hurricanes and Global Warming. *Science*, **308**, 1753-1754
- Vitart, F., J. L. Anderson, and W. F. Stern, 1997: Simulation of Interannual Variability of Tropical Storm Frequency in an Ensemble of GCM Integrations. *J. Climate*, **10**, 745–760..
- Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry, H.-R. Chang, 2005: Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment. *Science*, **309**, 1844.-1946
- Wentz, F. J., L. Ricciardulli, K. Hilburn, and C. Mears, 2007: How Much More Rain Will Global Warming Bring? *Science*, **317**, 233-235.



附表

(a) EC-interim 颱風水氣和西北太平洋大氣溫度之相關係數

Correlation Coefficient : TCWV in TC & T _{atm} over WNP										EC-interim
Per	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
TC	0.06	0.25	0.27	0.25	0.26	0.30	0.35	0.38	0.43	0.58
TS	0.02	0.21	0.26	0.39	0.40	0.40	0.45	0.49	0.50	0.54
TY	-0.22	-0.02	0.01	-0.01	-0.02	0.01	0.06	0.06	0.24	0.28
STY	0.01	-0.04	-0.01	0.10	0.14	0.14	0.14	0.11	0.11	0.06

(b) NCEP-CFSR 颱風水氣和西北太平洋大氣溫度之相關係數

Correlation Coefficient : TCWV in TC & T _{atm} over WNP										NCEP-CFSR
Per	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
TC	0.12	0.34	0.38	0.44	0.45	0.46	0.52	0.57	0.51	0.42
TS	-0.08	0.25	0.27	0.40	0.48	0.47	0.46	0.47	0.50	0.47
TY	-0.02	0.10	0.17	0.17	0.18	0.22	0.27	0.34	0.36	0.15
STY	0.16	0.28	0.29	0.31	0.33	0.38	0.34	0.29	0.25	0.12

表 3-1: 年際相減迴歸分析中，颱風水氣和西北太平洋大氣季平均溫度之相關係數。橫軸為百分位組，縱軸為強度分類，從上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。(a) EC-interim 結果，(b) NCEP-CFSR 結果，粗體字代表通過 95% 信心水準統計檢定。

Total hours of Tropical Cyclone's life span during 1979-2003		MRI-AGCM	
Category	Cat. 0 and above	Cat. 1 and above	Cat. 3 and above
Observation	84393 (100%)	32958 (39.1%)	3441 (4.1%)
MRI: present	57782 (100%)	29878 (51.8%)	14561 (25.2%)
MRI: Future	39433 (100%)	20817 (52.9%)	10978 (27.8%)

表 3-2：西北太平洋 1979-2003 年所有熱帶氣旋的生命期長度，從上而下分別是觀測資料、MRI-AGCM(1979-2003)、MRI-AGCM(2075-2099)。引用陳 et al. (2011)。



(a) MRI-AGCM 颱風水氣和西北太平洋大氣溫度之相關係數(1979-2003)

Correlation Coefficient : TCWV in TC & T _{atm} over WNP										MRI-AGCM(1979-2003)
Per	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
TC	0.22	0.31	0.46	0.53	0.61	0.67	0.72	0.73	0.69	0.46
TS	-0.17	0.16	0.33	0.46	0.60	0.63	0.61	0.55	0.42	0.36
TY	-0.01	0.29	0.42	0.43	0.45	0.55	0.63	0.71	0.72	0.65
STY	-0.03	0.11	0.20	0.21	0.23	0.38	0.45	0.49	0.56	0.56

(b) MRI-AGCM 颱風水氣和西北太平洋大氣溫度之相關係數(2075-2099)

Correlation Coefficient : TCWV in TC & T _{atm} over WNP										MRI-AGCM(2075-2099)
Per	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
TC	0.08	0.40	0.49	0.51	0.58	0.60	0.67	0.69	0.68	0.67
TS	0.07	0.27	0.32	0.37	0.46	0.48	0.54	0.56	0.54	0.52
TY+STY	-0.02	0.10	0.17	0.17	0.18	0.22	0.27	0.34	0.36	0.15

(c) MRI-AGCM 颱風水氣和西北太平洋大氣溫度之相關係數(1979-2003,2075-2099)

Correlation Coefficient : TCWV in TC & T _{atm} over WNP										MRI-AGCM(1979s-2075s)
Per	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
TC	-0.03	0.11	0.20	0.21	0.23	0.38	0.45	0.49	0.56	0.56
TS	0.01	0.29	0.39	0.42	0.51	0.52	0.54	0.52	0.44	0.42

表 3-3: 年際相減迴歸分析中, 颱風水氣和西北太平洋大氣季平均溫度之相關係數。橫軸為百分位組, 縱軸為強度分類, 從上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。(a) MRI-AGCM (1979-2003)結果, (b) MRI-AGCM (2075-2099)結果, 最後一欄為中颱風加強颱風的結果, (c) MRI-AGCM (1979-2003, 2075-2099), 粗體字代表通過 95%信心水準統計檢定。

Correlation Coefficient : TCWV in TC & TCWV CONV by TC										EC-interim
Per	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
TC	0.53	0.73	0.79	0.71	0.72	0.77	0.70	0.69	0.48	0.23
TS	0.30	0.67	0.68	0.65	0.64	0.64	0.56	0.46	0.46	0.24
TY	0.63	0.58	0.65	0.65	0.57	0.66	0.67	0.39	0.20	0.38
STY	0.59	0.72	0.63	0.59	0.54	0.50	0.53	0.68	0.64	0.53

表 4-1：年際相減迴歸分析中，颱風水氣和颱風水氣輻合量之相關係數。橫軸為百分位組，縱軸為強度分類，從上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。粗體字代表通過 95%信心水準統計檢定，紅字代表相關係數達 0.60。



Correlation Coefficient : TCWV surr by TC & Tatm over WNP										EC-interim
Per	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
TC	-0.24	0.01	0.31	0.19	0.26	0.20	0.56	0.43	0.14	0.28
TS	-0.30	0.05	0.25	0.29	0.40	0.40	0.32	0.43	0.37	0.38
TY	-0.24	-0.06	0.13	-0.02	0.08	0.35	0.28	0.14	0.07	0.34
STY	0.02	0.12	0.25	0.34	0.23	0.21	0.24	-0.19	-0.12	-0.20

表 4-2：年際相減迴歸分析中，颱風外圍水氣和西北太平洋大氣溫度之相關係數。橫軸為百分位組，縱軸為強度分類，從上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。粗體字代表通過 95%信心水準統計檢定。

Correlation Coefficient : TCWV in TC & TCWV surr										EC-interim
Per	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
TC	0.55	0.76	0.80	0.75	0.74	0.69	0.61	0.62	0.06	0.25
TS	0.62	0.78	0.81	0.63	0.73	0.81	0.75	0.76	0.79	0.76
TY	0.73	0.66	0.79	0.75	0.68	0.48	0.21	0.06	0.15	0.59
STY	0.67	0.72	0.68	0.77	0.66	0.64	0.66	0.37	0.29	0.44

表 4-3：年際相減迴歸分析中，颱風水氣和颱風外圍水氣之相關係數。橫軸為百分位組，縱軸為強度分類，從上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。粗體字代表通過 95%信心水準統計檢定，紅字代表相關係數達 0.70。

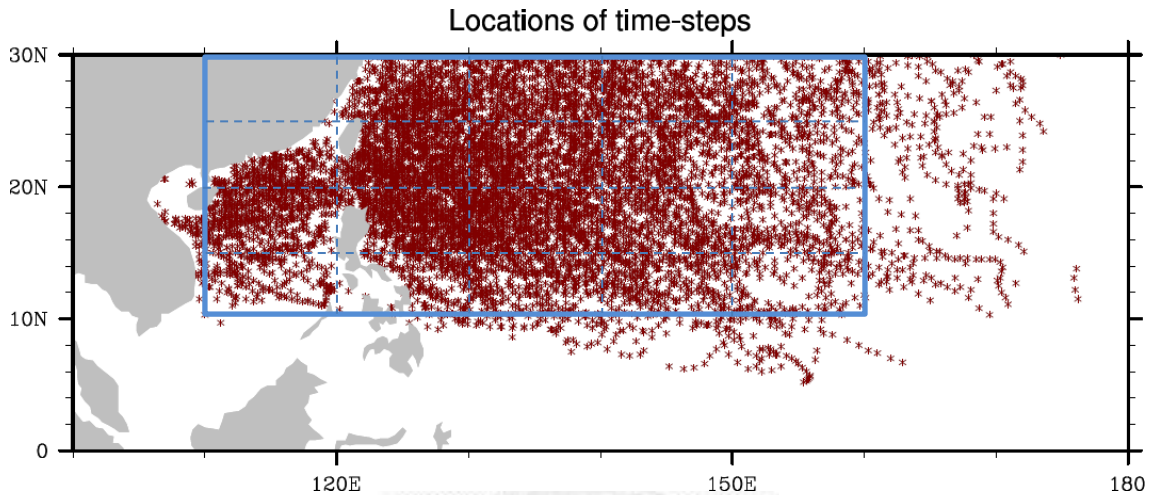


Correlation Coefficient : TCWV in TC & CONV by TC										EC-interim
Per	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
TC	0.37	0.76	0.66	0.58	0.57	0.32	0.60	0.51	0.19	-0.08
TS	0.06	0.58	0.54	0.48	0.47	0.47	0.45	0.46	0.41	-0.01
TY	0.28	0.57	0.58	0.25	0.34	0.22	0.46	0.15	0.05	0.09
STY	0.30	0.56	0.35	0.39	0.39	0.12	0.20	0.39	0.40	0.38

表 4-4：年際相減迴歸分析中，颱風水氣和颱風低層輻合之相關係數。橫軸為百分位組，縱軸為強度分類，從上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。粗體字代表通過 95%信心水準統計檢定。

附圖

(a) 所有颱風位置



(b) 所有弱颱風位置

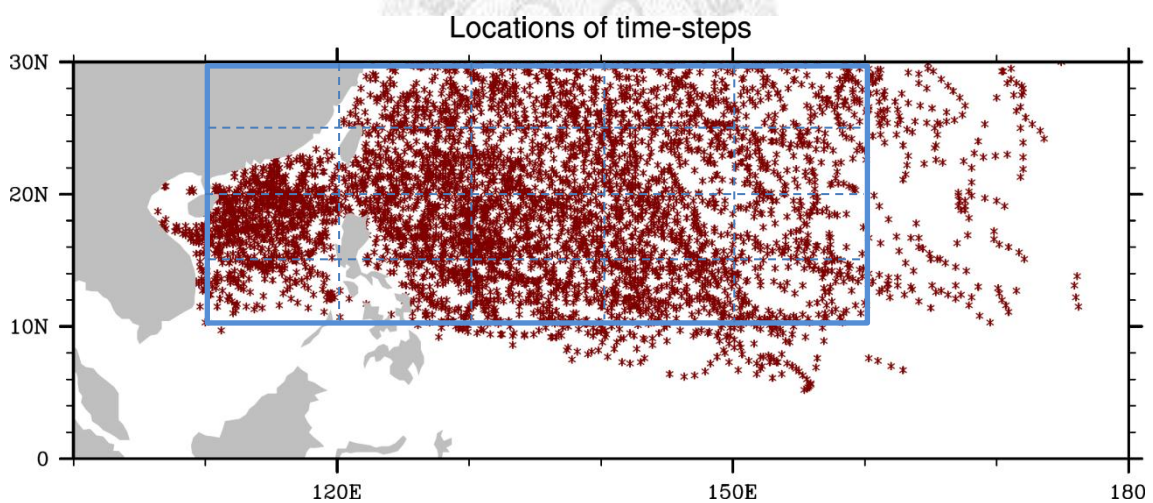
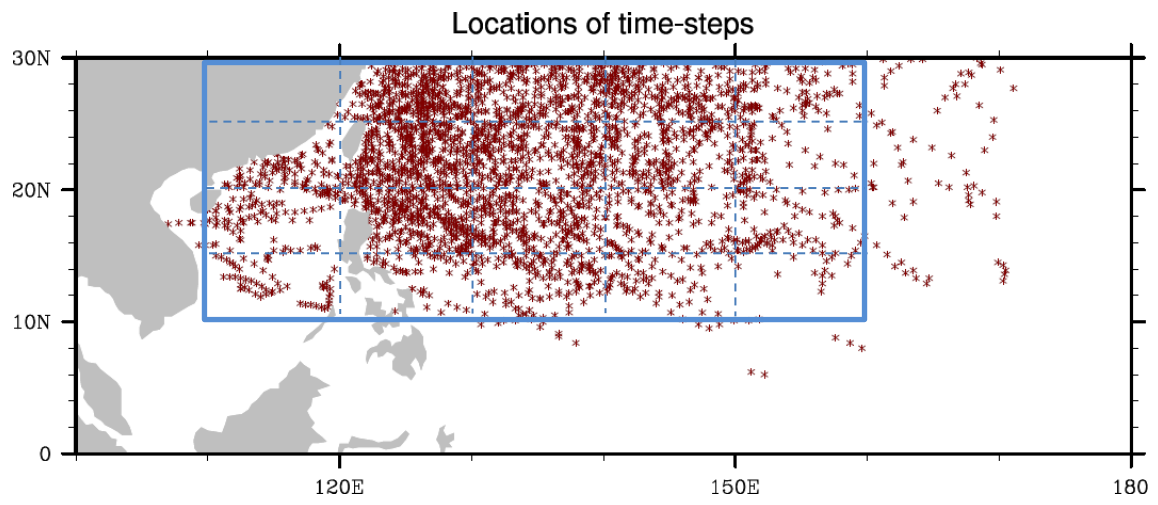
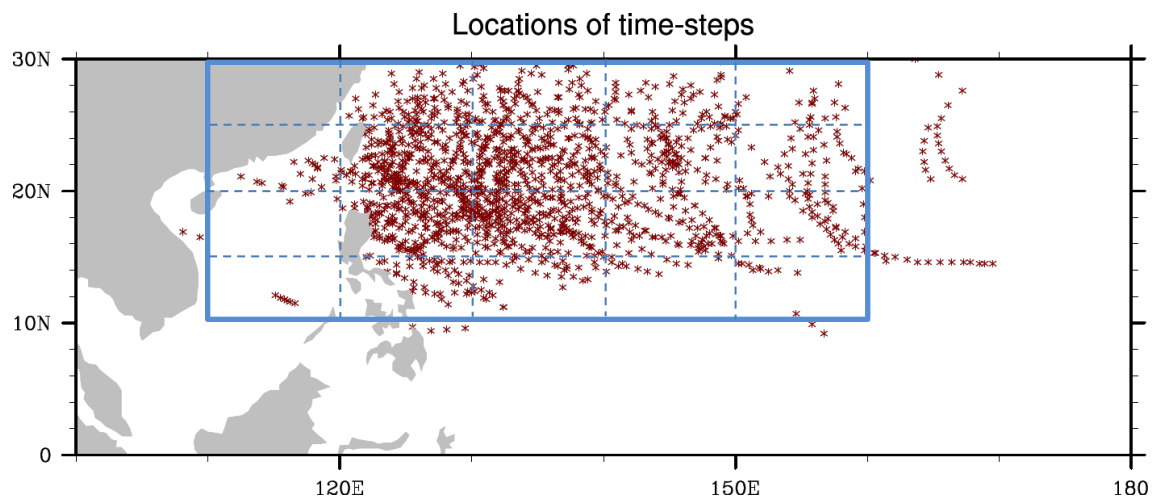


圖 2-1：西北太平洋地區 1979-2009 年，六至十月，熱帶地區 ($100-180^{\circ}\text{E}$, $0-30^{\circ}\text{N}$) 之颱風所有時間點位置，而藍色方框為計算大氣溫度的區域 ($110-160^{\circ}\text{E}$, $10-30^{\circ}\text{N}$)。 (a) 所有颱風資料(包含所有強度)，(b) 所有弱颱風(熱帶風暴等級)資料，(c) 所有中颱風(category 1 and 2)資料，(d) 所有強颱風(category 3, 4 and 5)資料。

(c) 所有中颱位置

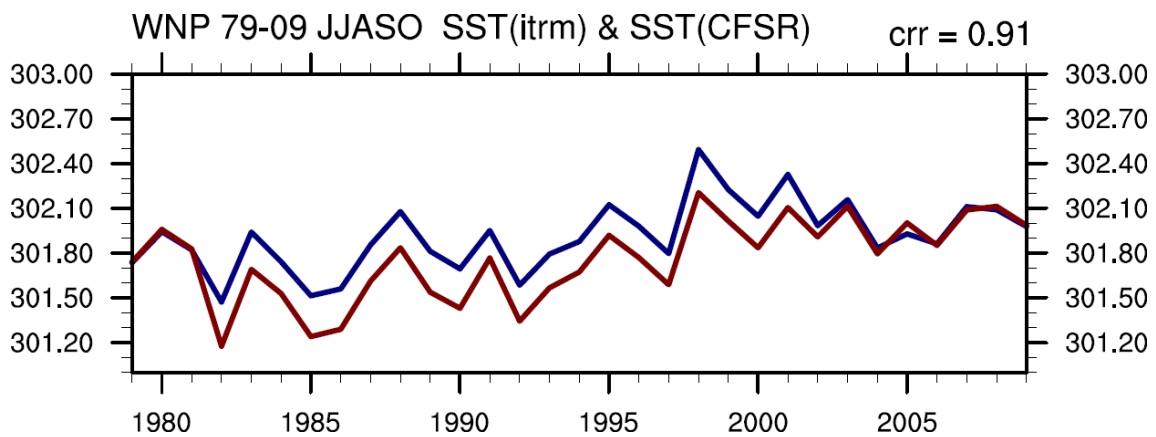


(d) 所有強颱位置

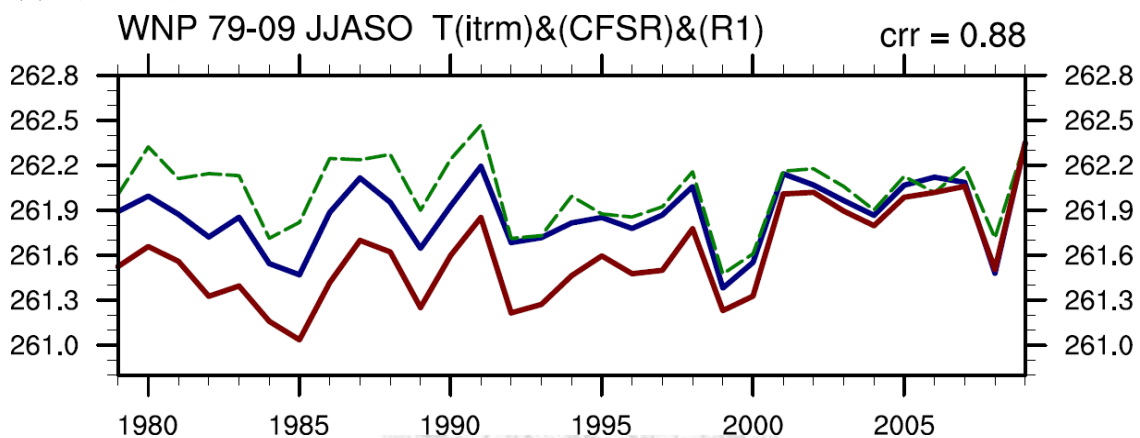


續圖 2-1。

(a) 平均海表面溫度



(b) 平均大氣溫度



(c) 平均總水氣量

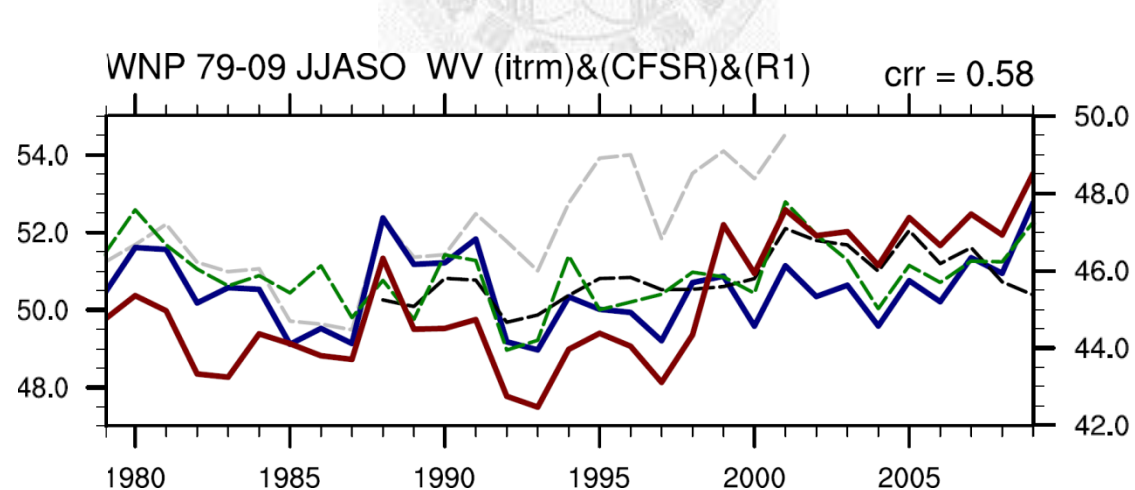
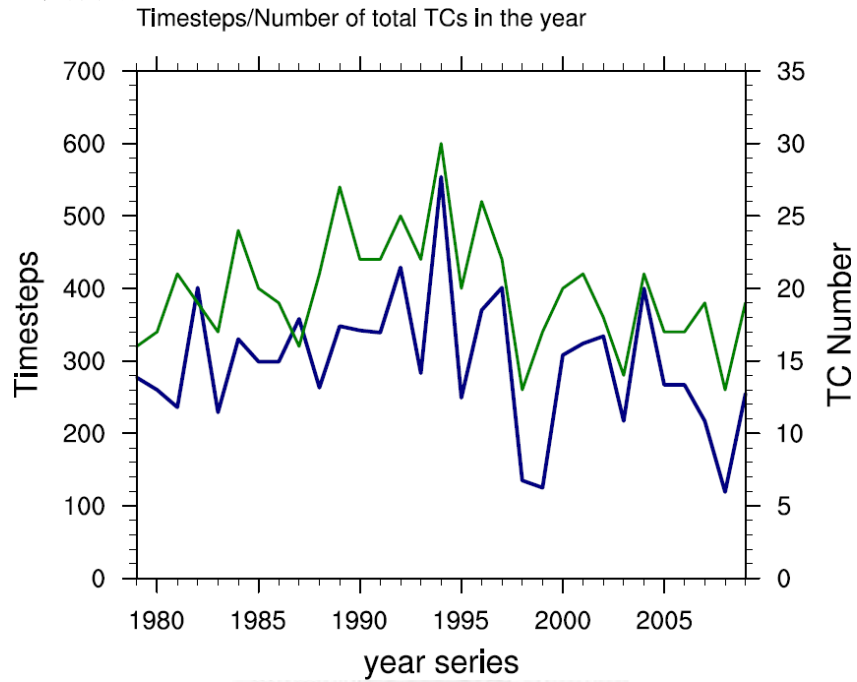


圖 2-2：西北太平洋(10-30⁰N, 110-160⁰E)六至十月平均。依不同資料計算：藍色為 EC-interim、紅色為 NCEP-CFSR、綠色為 NCEP-R1、黑色為 SSM/I、灰色為 ERA40。右上為 interim 和 CFSR 之相關係數。(a) 平均海表面溫度 (CFSR 以表面溫度代替)，(b) 平均大氣溫度 (1000-200hPa)，(c) 平均總水氣量 (NCEP-R1 為右方座標軸，其餘左方座標軸)。

(a) 所有颱風資料數



(b) 颱風強度分類資料數

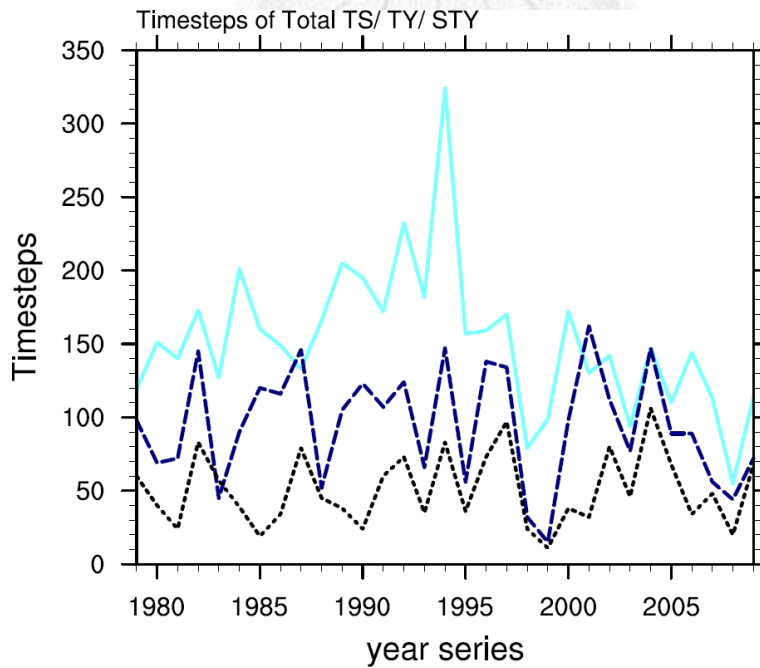


圖 2-3：(a) 所有颱風(所有強度)的資料數，藍線代表時間點(time-steps)，綠線代表颱風數。(b) 三種強度分類的時間點資料數，淺藍色為弱颱(TS)，深藍色為中颱(TY)，黑色為強颱(STY)。

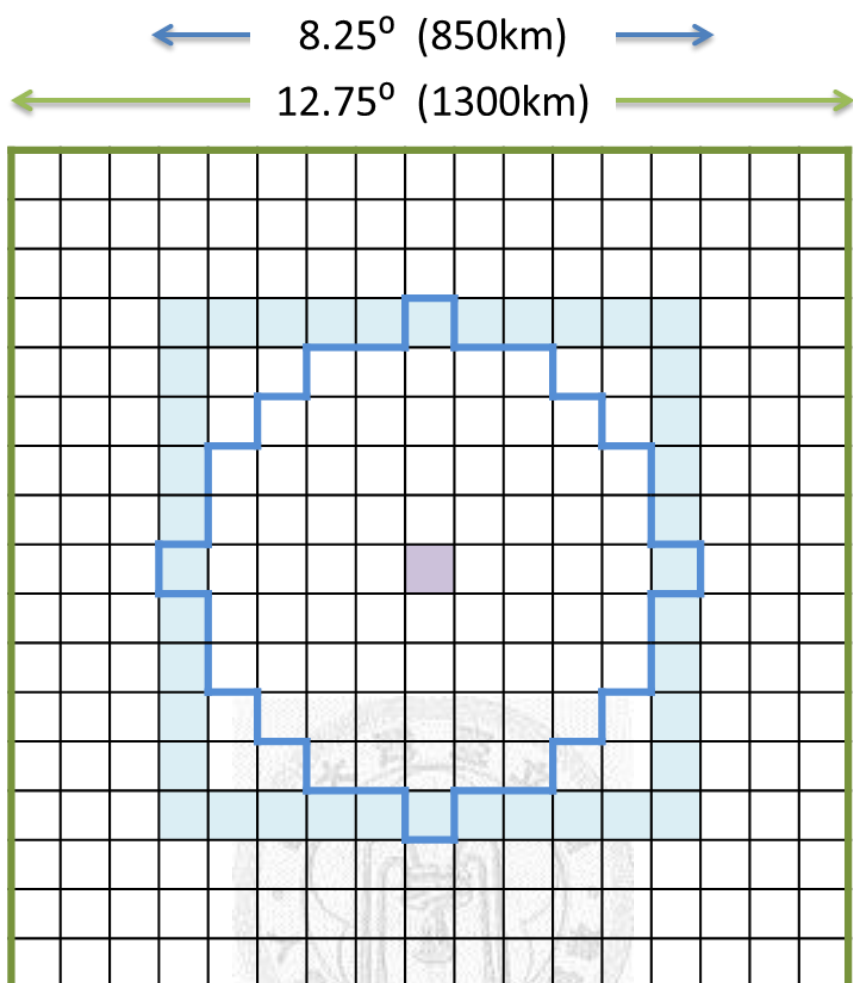


圖 2-4：颱風範圍內資料計算示意圖。紫色點為最接近暴風中心之網格點。以紫點為中心，半徑五格之藍色外框近似圓，代表颱風範圍（直徑約 850km），以計算颱風內總水氣量。藍框至綠框的範圍內代表颱風外圍，以計算颱風外圍水氣。藍色網格代表颱風範圍邊界，以計算邊界上之輻合、水氣輻合。

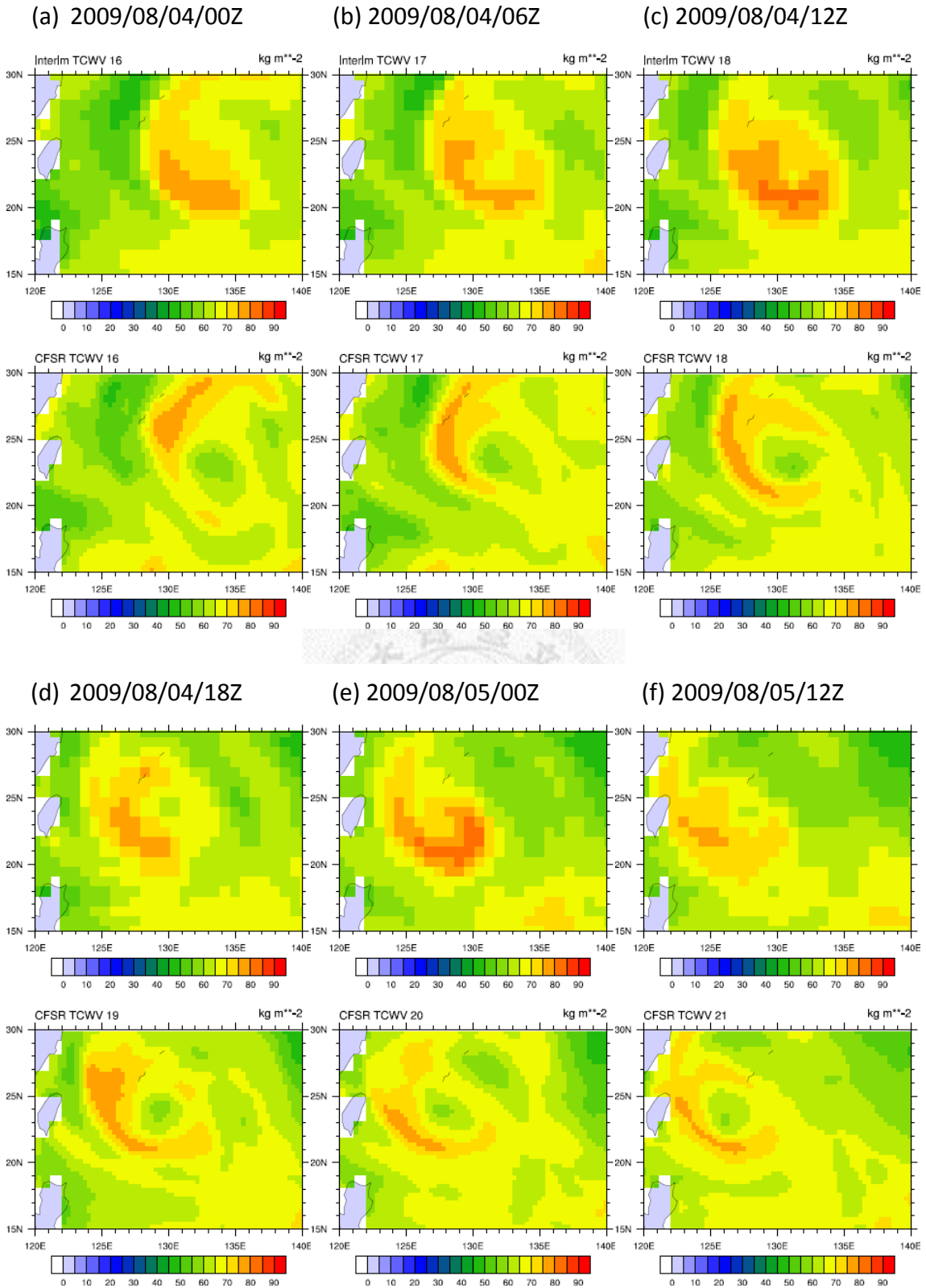


圖 2-5：總水氣量個案，時間為 2009/08/04/00Z 至 2009/08/05/12Z，每組上圖皆為 EC-interim 的結果，下圖為 NCEP-CFSR 的結果。

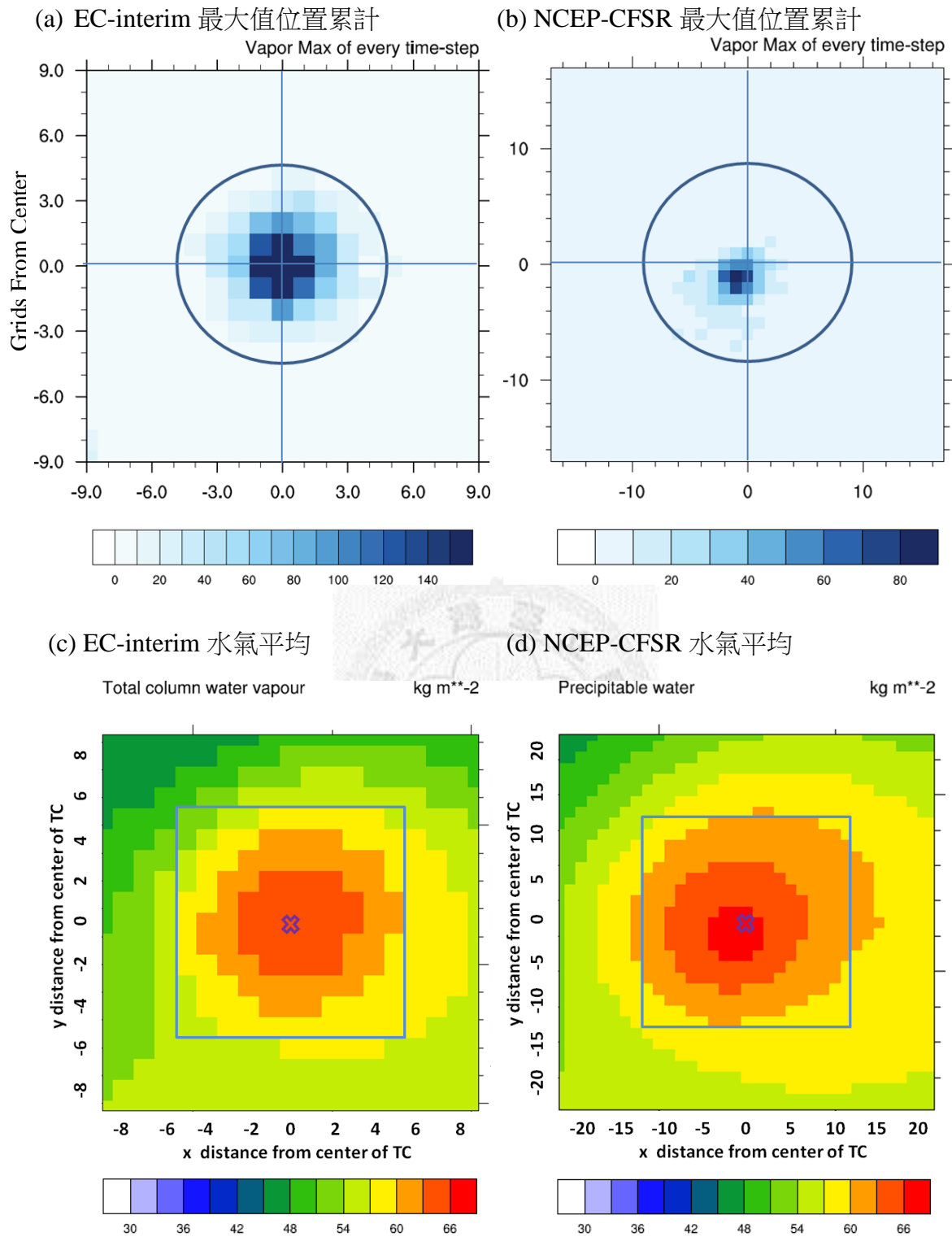
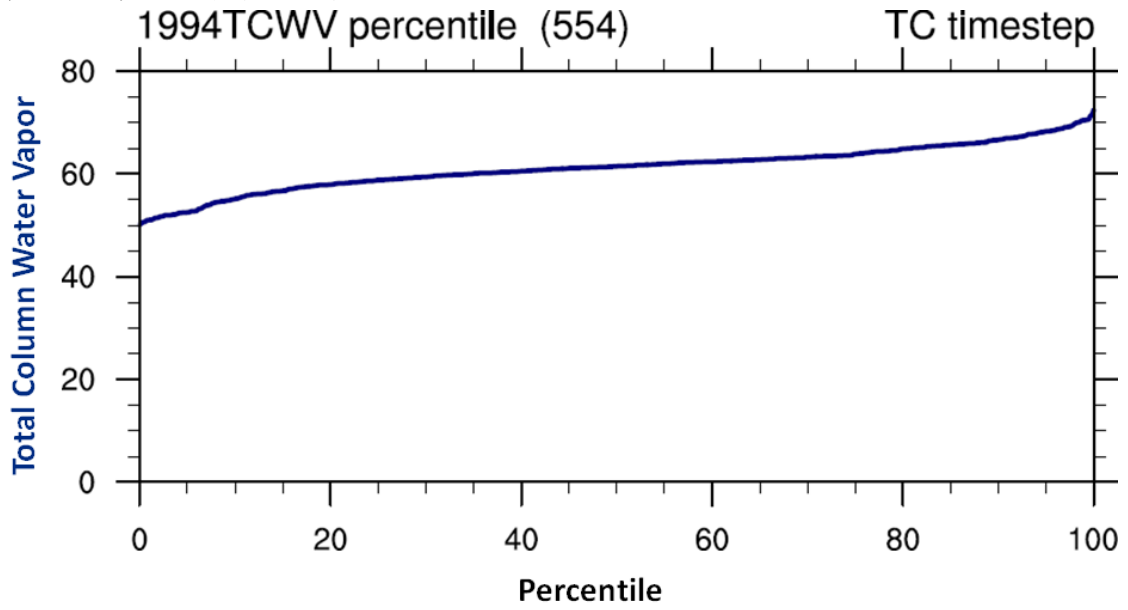


圖 2-6：(a)、(b) 為所有個案總水氣量之最大值網格位置的累計。(c)、(d) 為所有個案總水氣量平均結果。縱軸與橫軸皆為距離中心的網格數。

(a) 1994 年颱風水氣百分位



(b) 1999 年颱風水氣百分位

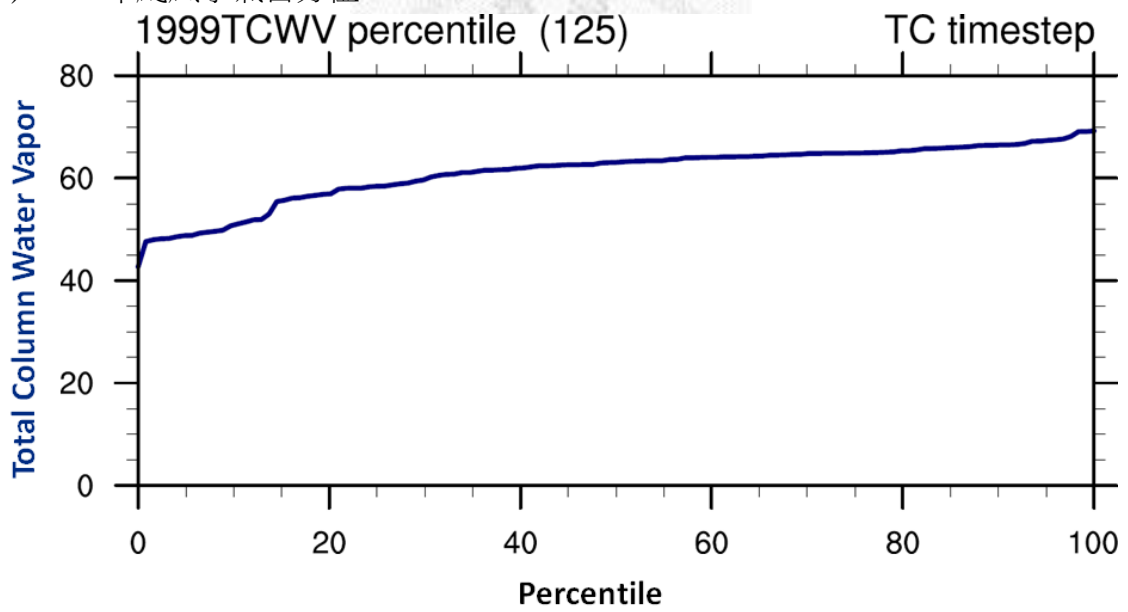
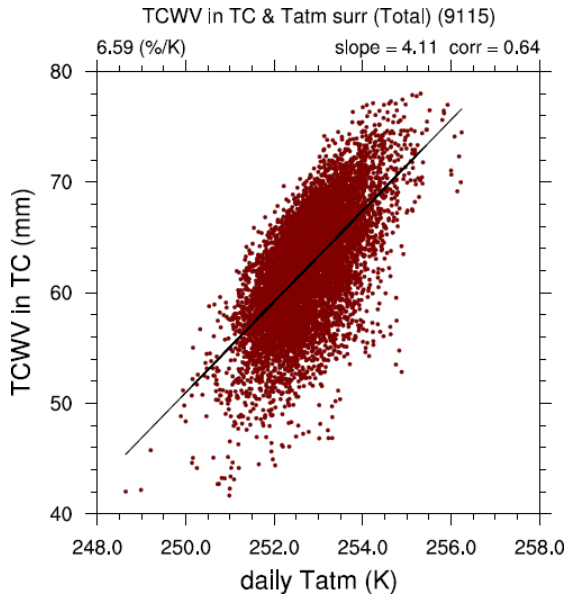
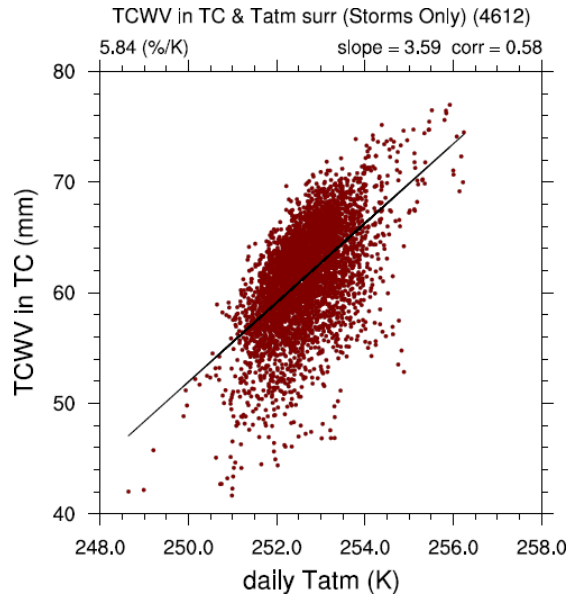


圖 2-7 颱風水氣百分位圖，(a) 1994 年，為資料數最多的一年，共 554 筆，(b) 1999 年為資料數最少的一年，共 125 筆。

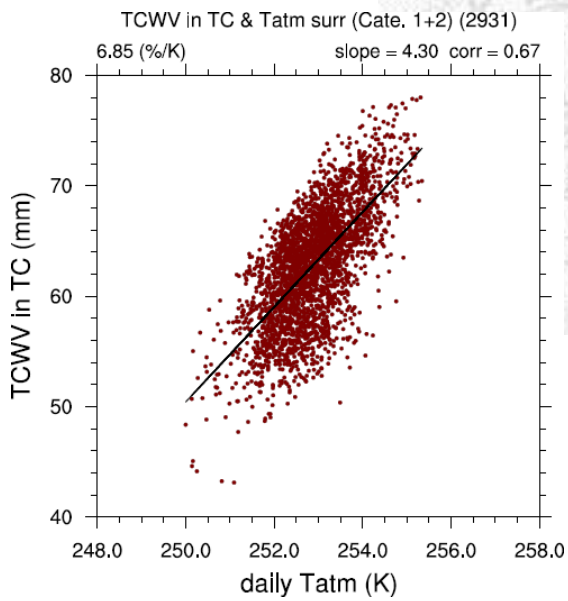
(a) 所有颱風



(b) 弱颱



(c) 中颱



(d) 強颱

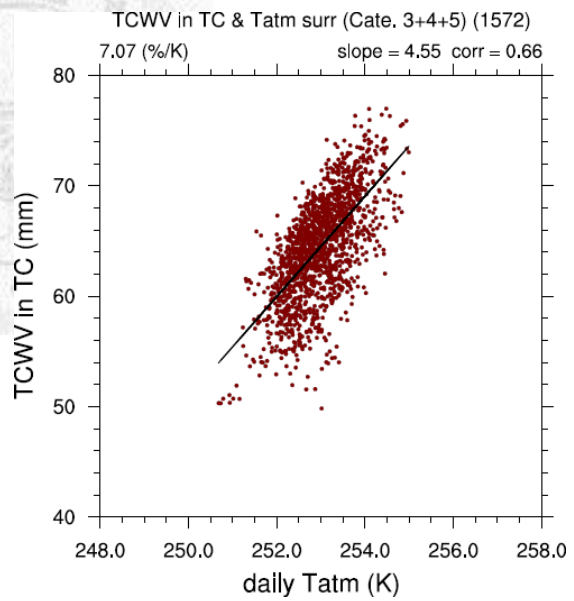
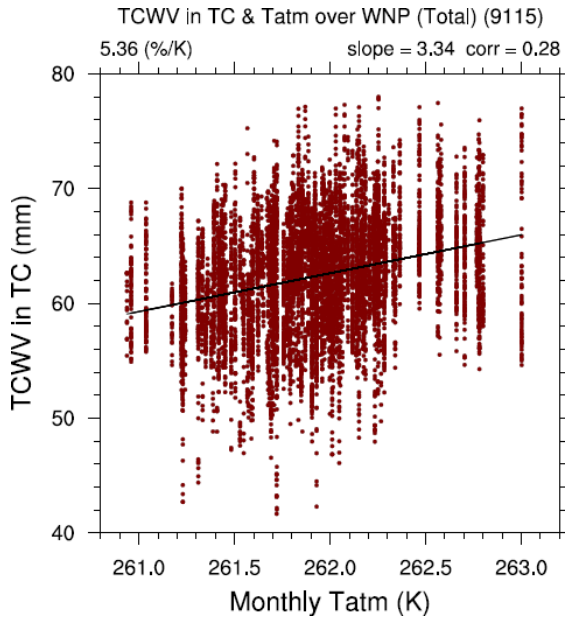
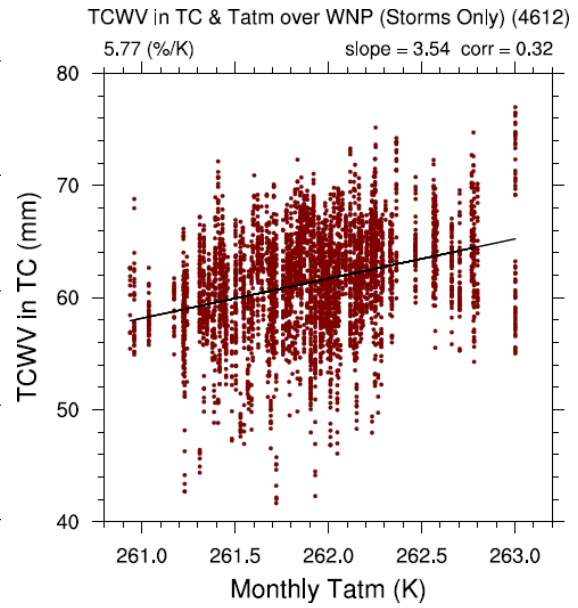


圖 3-1：颱風水氣與日尺度颱風外圍大氣溫度的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱等級，(c) 中颱等級，(d) 強颱等級。

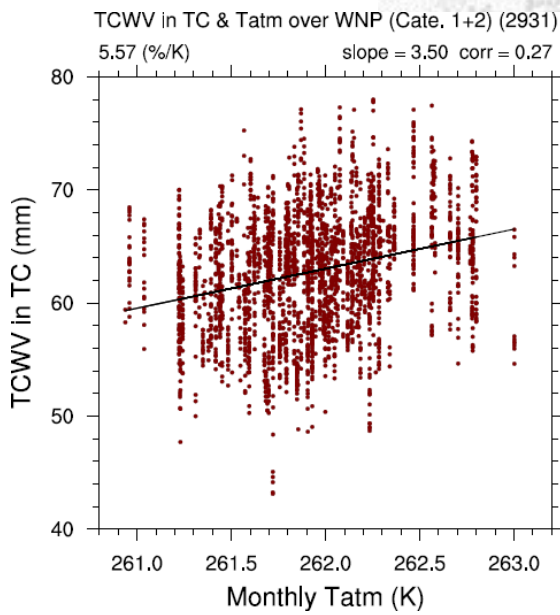
(a) 所有颱風



(b) 弱颱



(c) 中颱



(d) 強颱

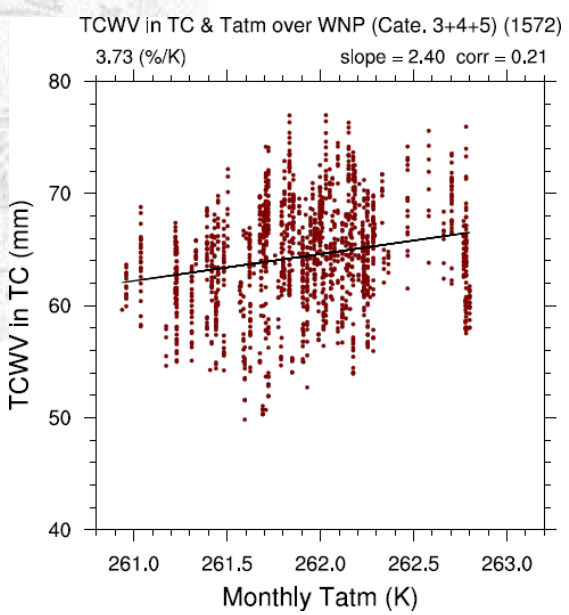
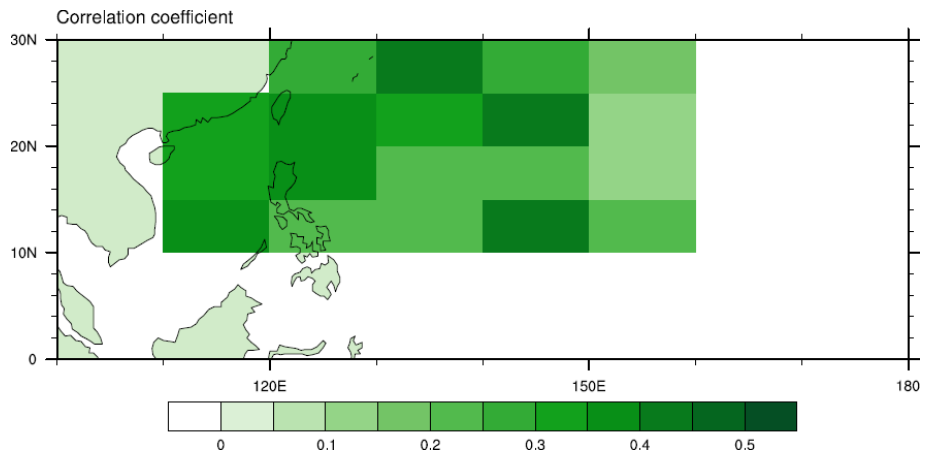
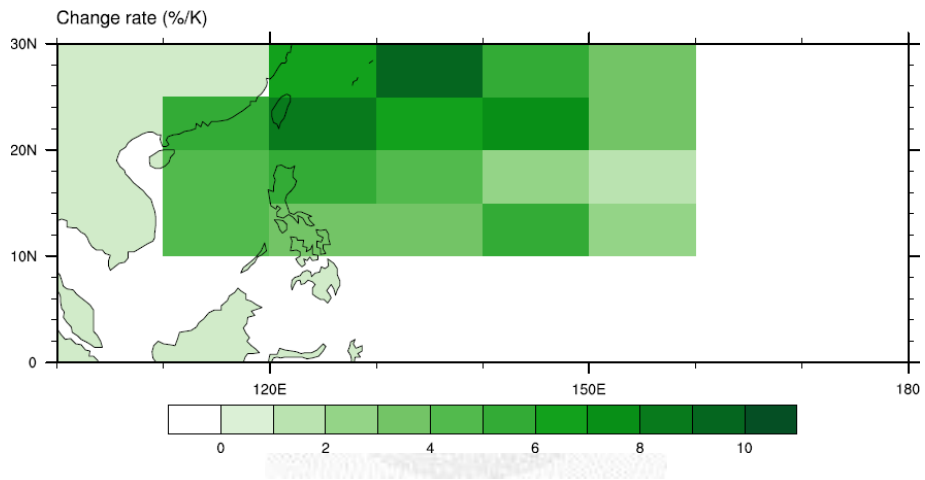


圖 3-2：颱風水氣與月尺度西北太平洋大氣溫度的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度的個案)，(b) 弱颱等級，(c) 中颱等級，(d) 強颱等級。

(a) 相關係數



(b) 水氣增加率



(c) 颱風總水氣量

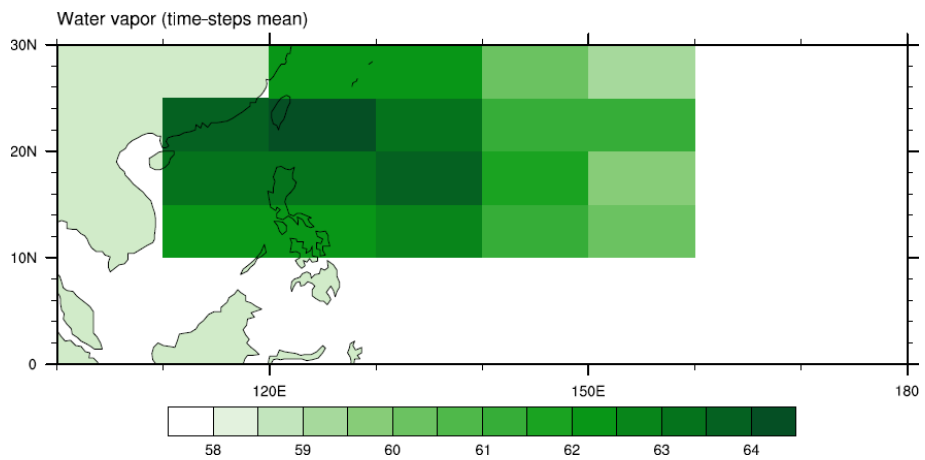
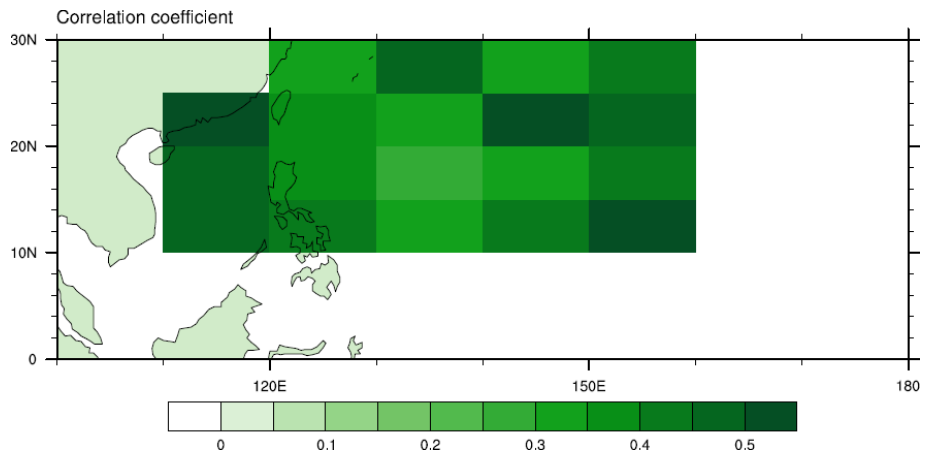


圖 3-3：區域分析：颱風水氣與西北太平洋平均大氣溫度的迴歸分析，(a) 相關係數，(b) 水氣增加率，(c) 颱風總水氣量。

(a) 相關係數



(b) 水氣增加率

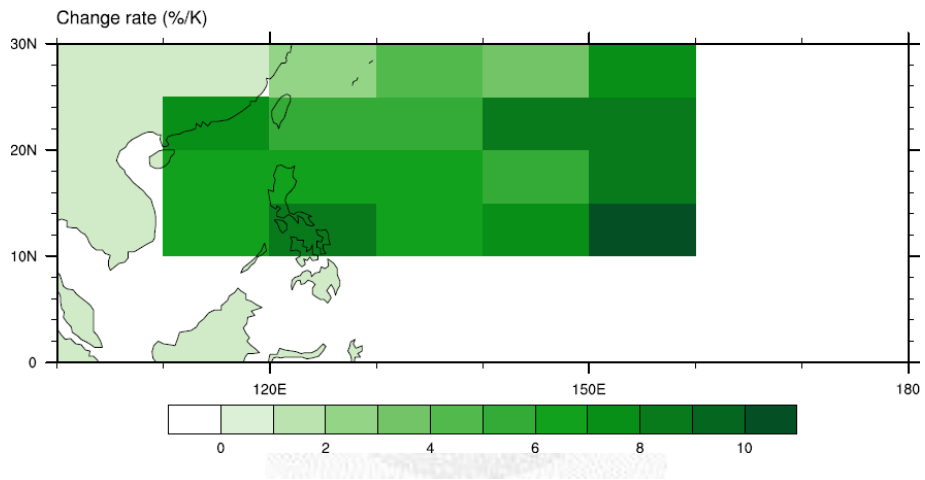
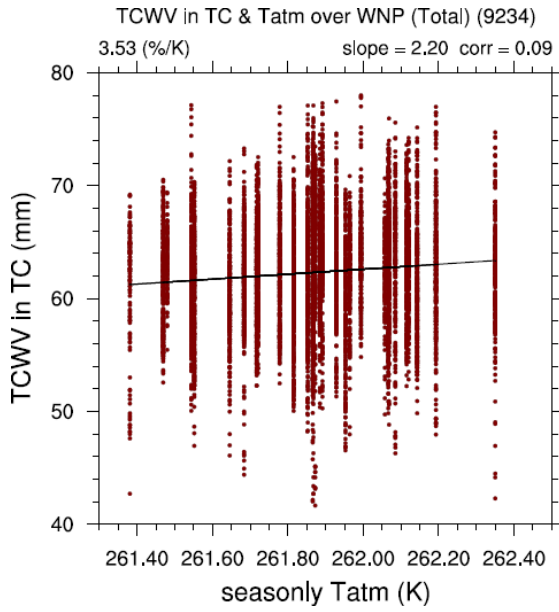
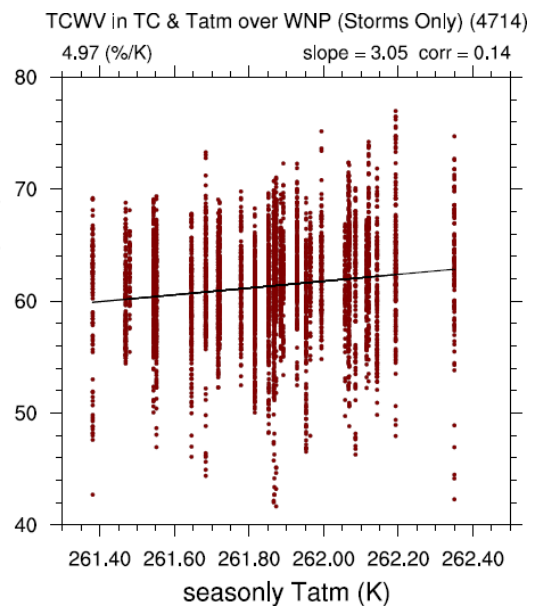


圖 3-4：區域分析：颱風水氣和綜觀區域大氣溫度的迴歸分析，(a) 相關係數，(b) 水氣增加率。

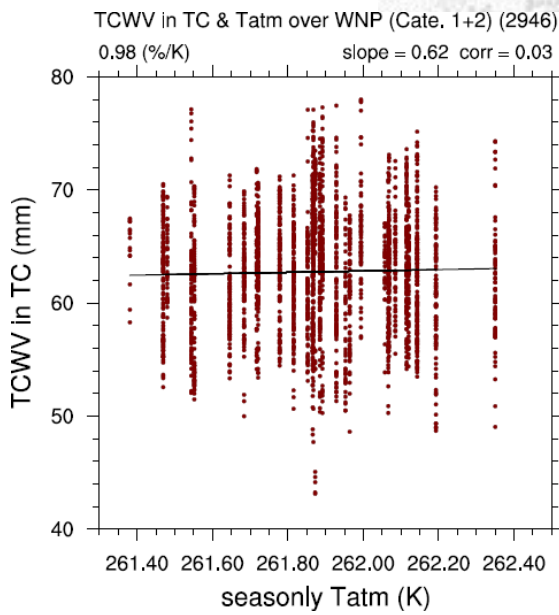
(a) 所有颱風



(b) 弱颱



(c) 中颱



(d) 強颱

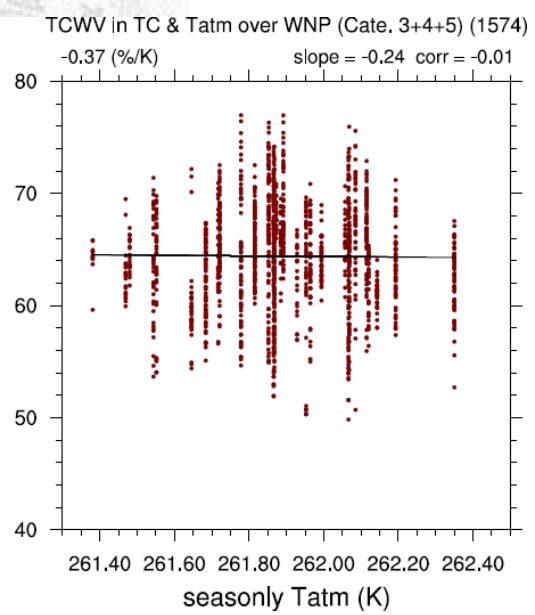


圖 3-5：颱風水氣與季尺度西北太平洋大氣溫度的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱等級，(c) 中颱等級，(d) 強颱等級。

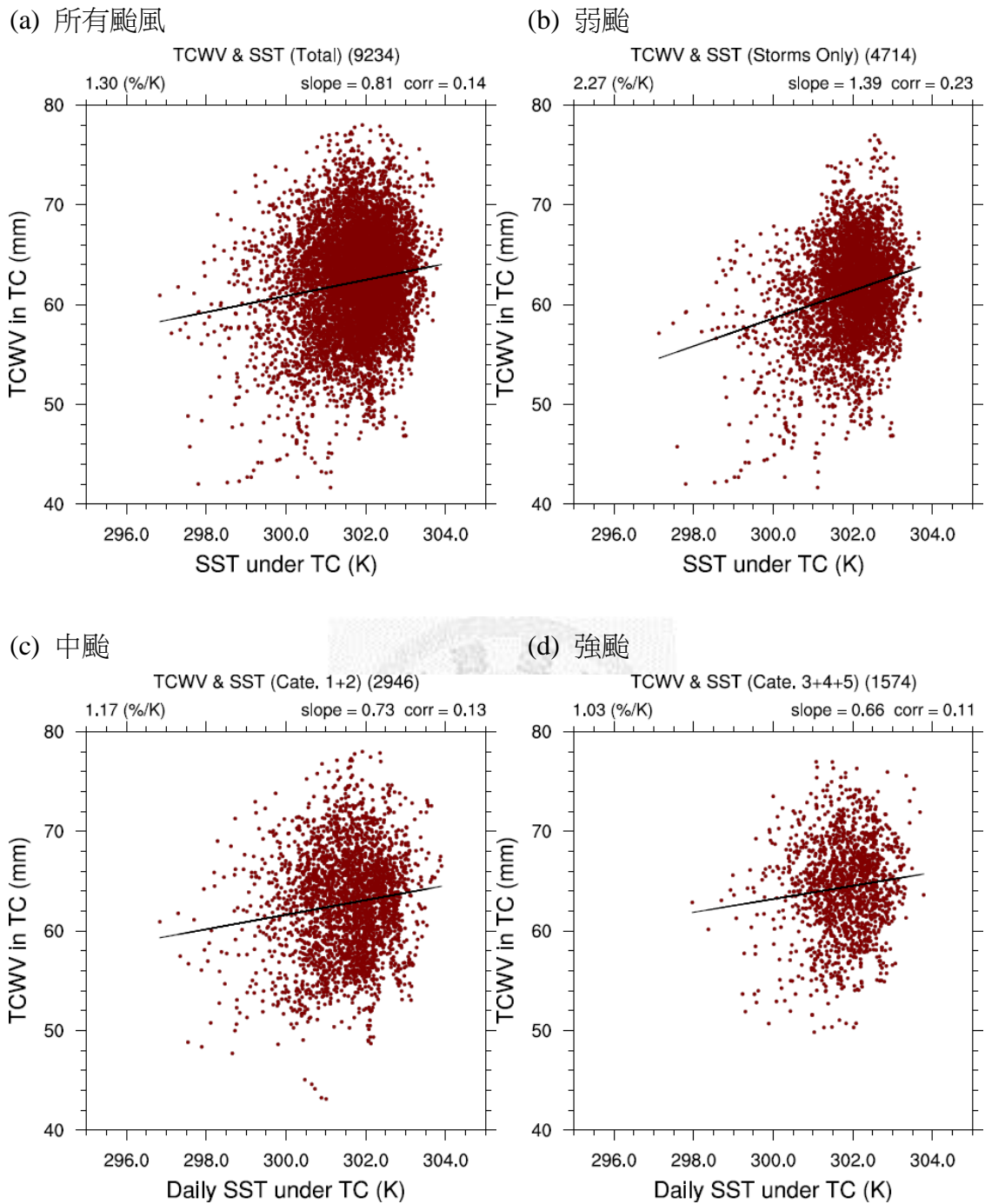
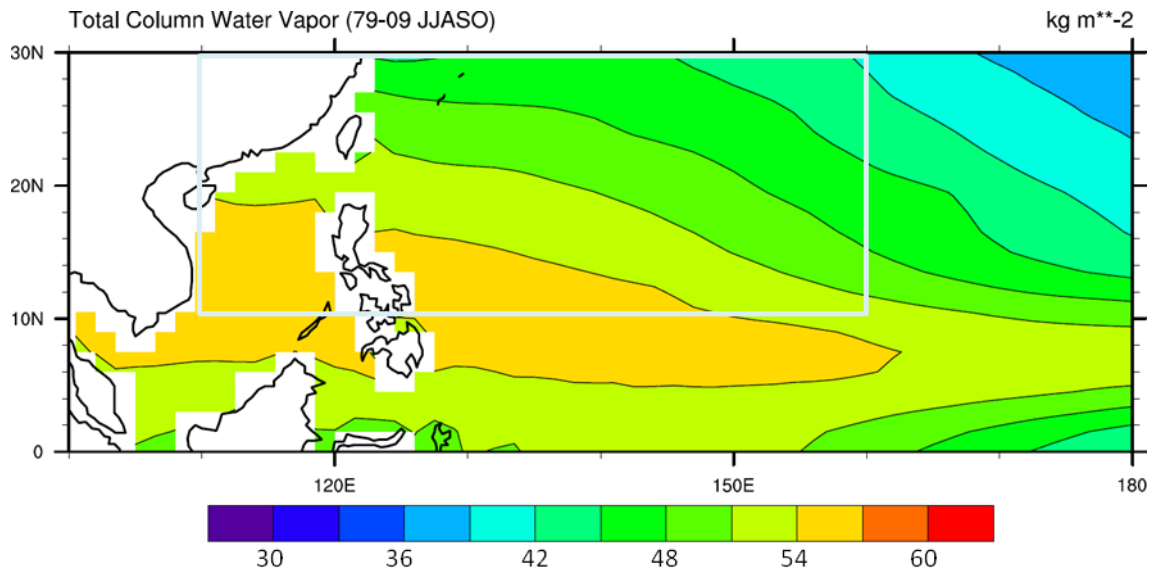


圖 3-6：颱風水氣與日尺度颱風範圍海表面溫度的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱風等級，(c) 中颱風等級，(d) 強颱風等級。

(a) EC-interim 西北太平洋 1979-2009 年颱風季



(b) NCEP-CFSR 西北太平洋 1979-2009 年颱風季

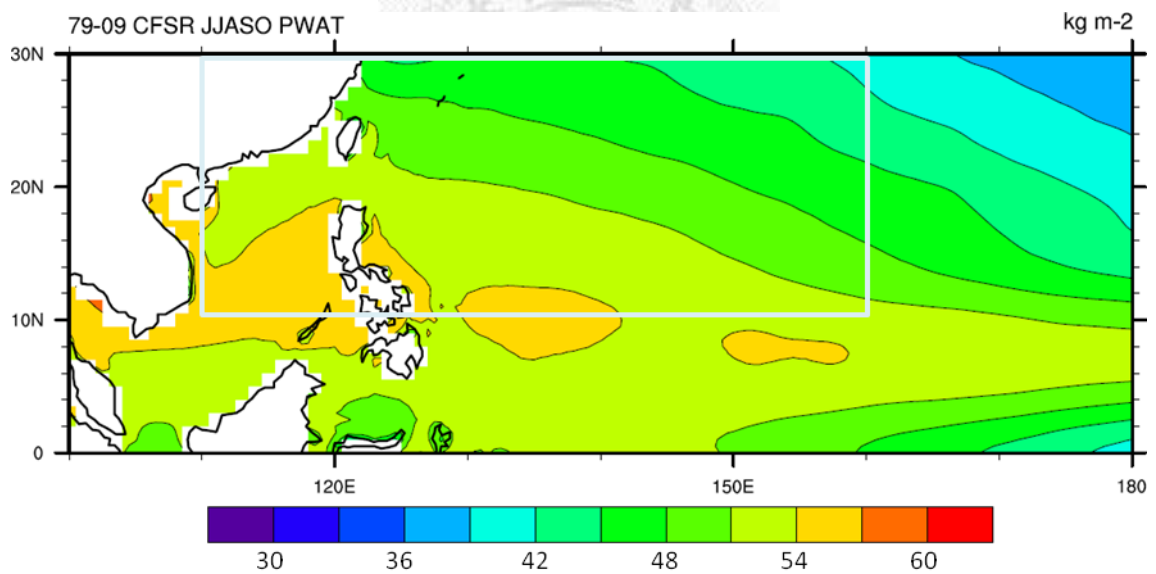
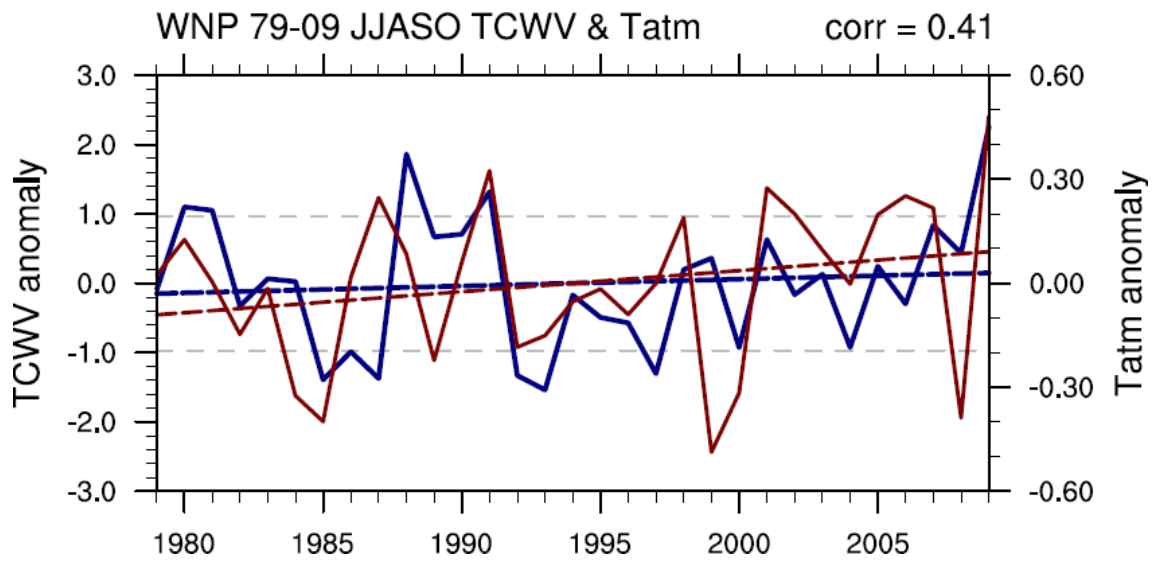


圖 3-7：西北太平洋 1979-2009 年颱風季(6-10 月)總水氣量氣候場，灰色方框為主要研究範圍，(a) EC-interim，(b) NCEP-CFSR。

(a) 西北太平洋水氣溫度年際變化



(b) 西北太平洋水氣溫度迴歸分析

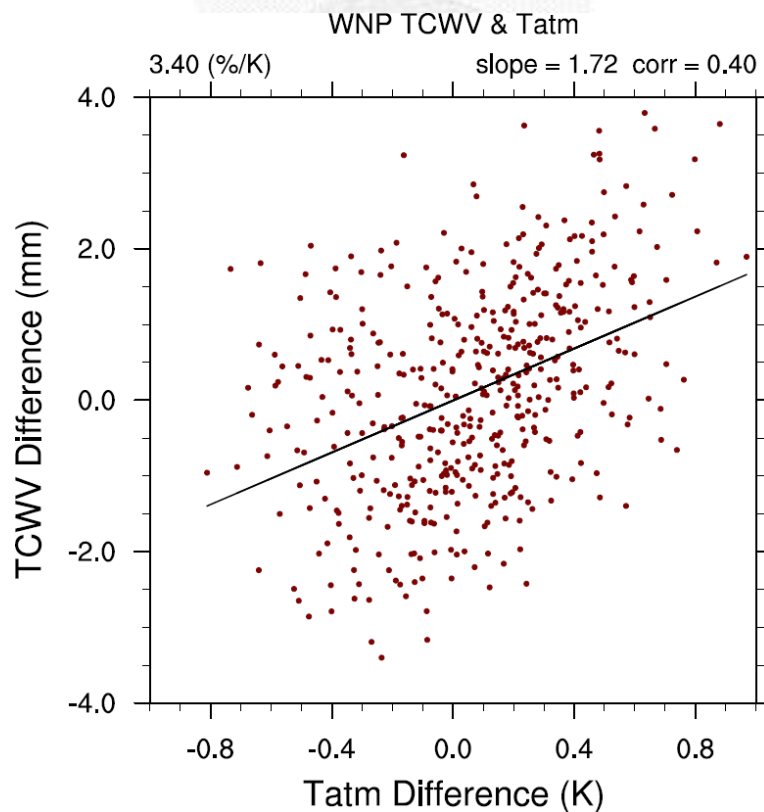
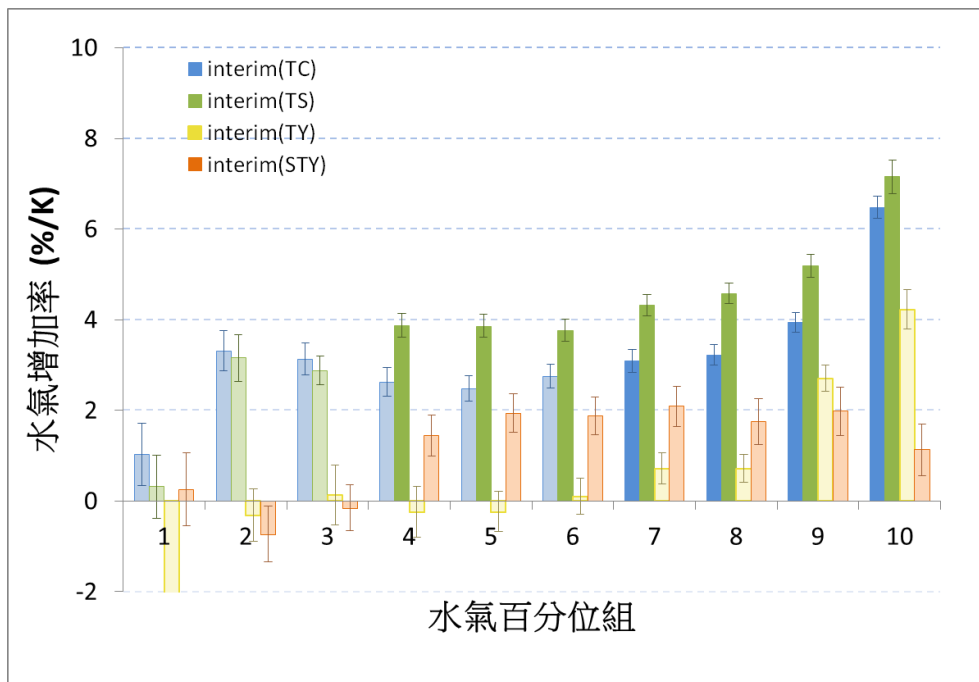


圖 3-8：(a) 西北太平洋水氣溫度年際變化，藍線是水氣，紅線是大氣溫度，灰線是水氣一個標準差，相關係數 0.41。(b) 西北太平洋水氣溫度迴歸分析，相關係數 0.40，迴歸直線斜率 1.72，水氣增加率 3.4 %/K。

(a) EC-interim 颱風水氣增加率



(b) NCEP-CFSR 颱風水氣增加率

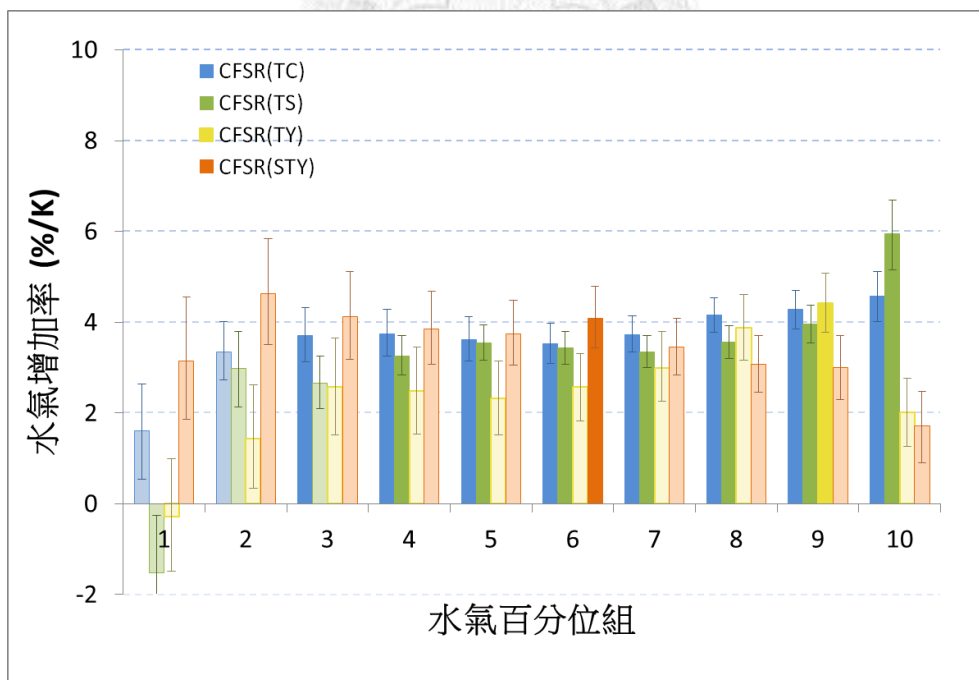
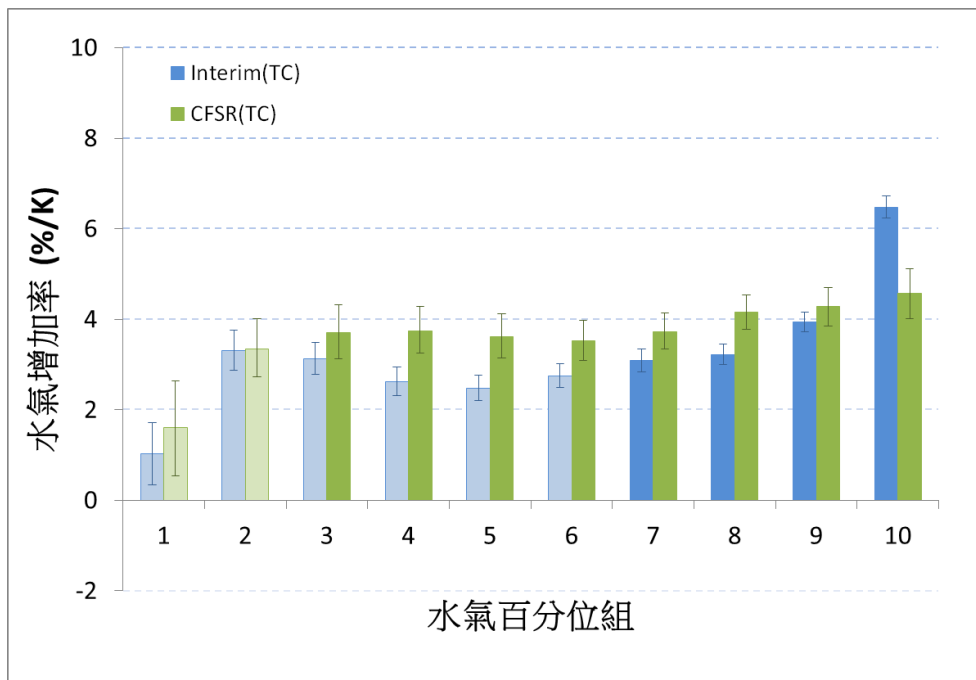


圖 3-9：年際相減法結果。縱軸為颱風水氣增加率，橫軸為颱風水氣百分位組（由小至大每組 10%）。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。(a) 為 EC-interim 結果，(b) 為 NCEP-CFSR 結果。

(a) 颱風水氣增加率



(b) 弱颱風水氣增加率

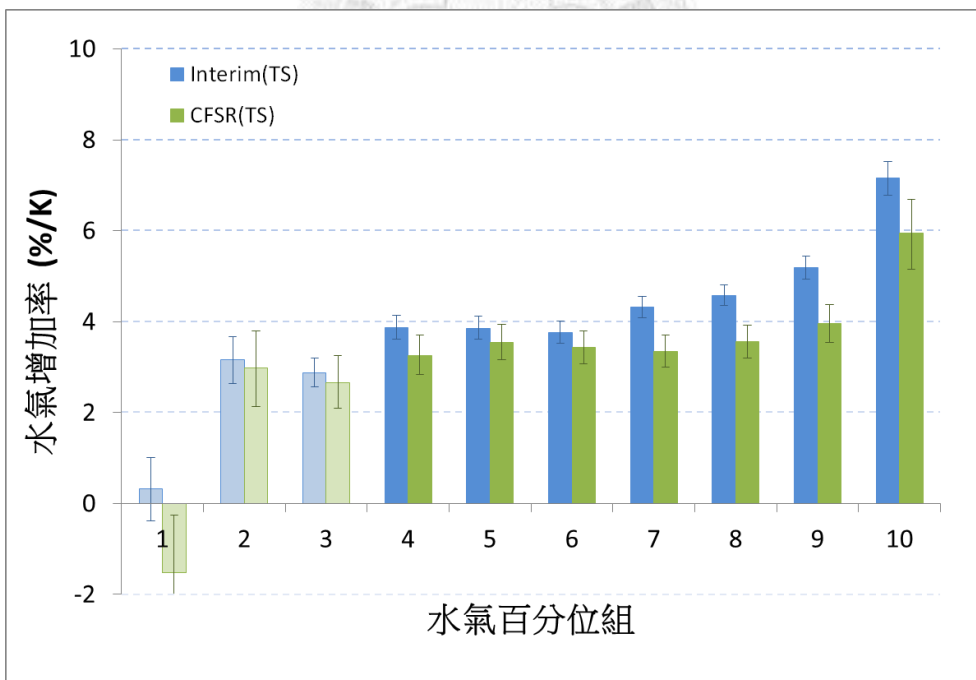
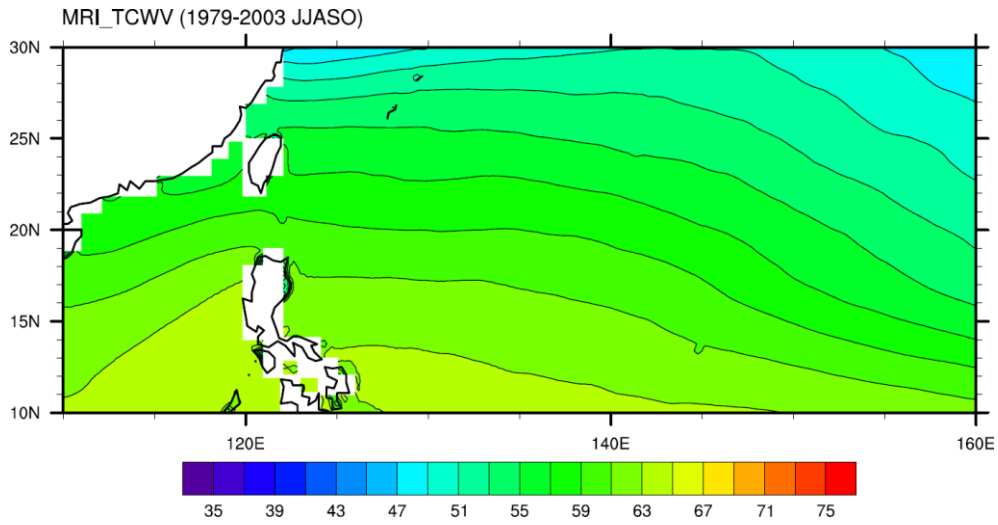
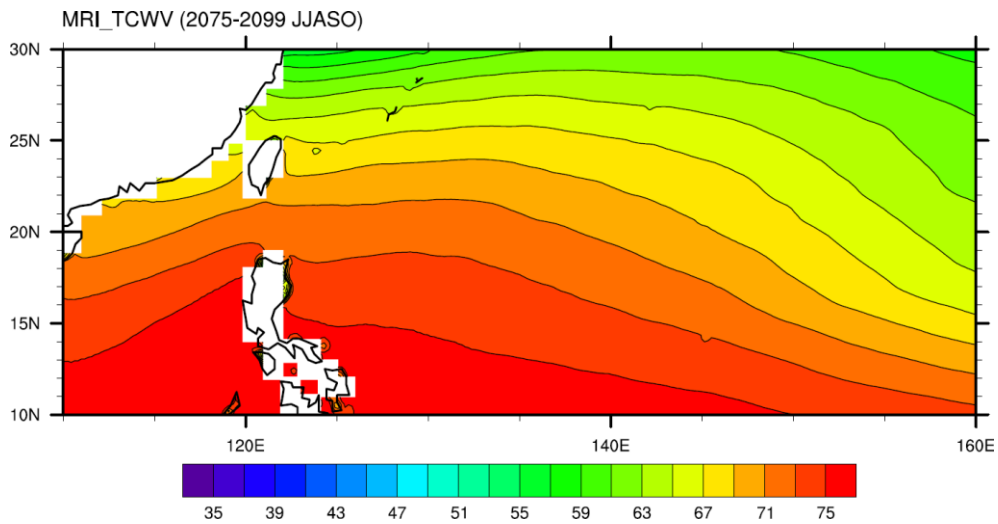


圖 3-10：年際相減法結果。縱軸為颱風水氣增加率，橫軸為颱風水氣百分位組（由小至大每組 10%）。藍色為 EC-interim 結果，綠色為 NCEP-CFSR 結果，淺色代表未通過檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。(a) 為颱風(所有強度)結果，(b) 為弱颱風等級結果。

(a) MRI-AGCM 之西北太平洋總水氣量氣候場(1979-2003)



(b) MRI-AGCM 之西北太平洋總水氣量氣候場(2075-2099)



(c) EC-interim 之西北太平洋總水氣量氣候場(1979-2009)

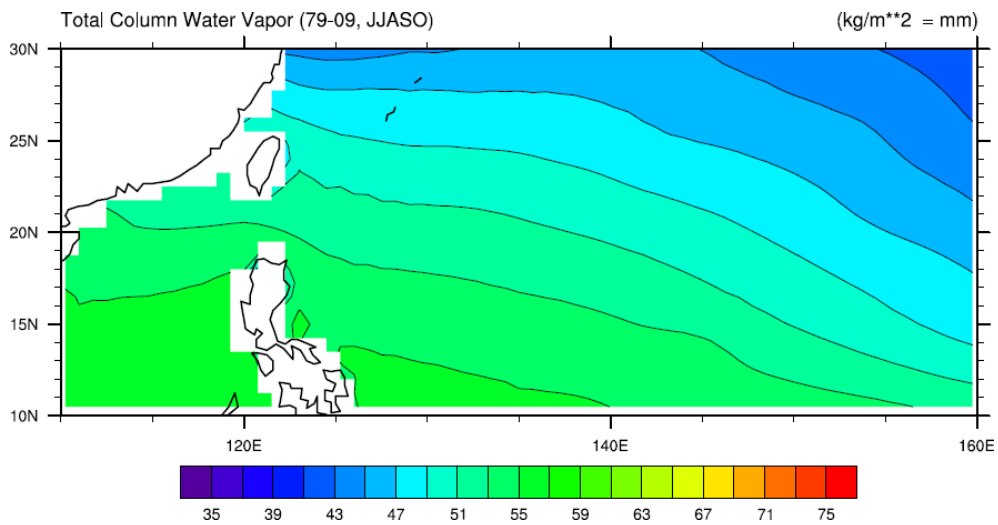
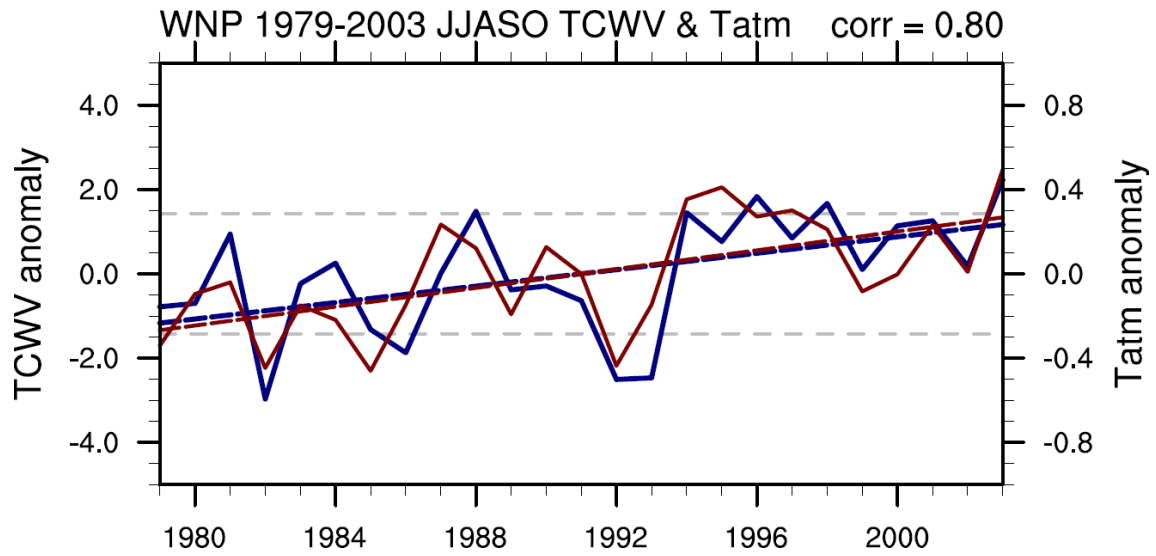


圖 3-11：西北太平洋總水氣量之颱風季氣候場，(a) MRI-AGCM 現今(1979-2003)，
(b) MRI-AGCM 未來(2075-2099)，(c) EC-interim (1979-2009)

(a) MRI-AGCM 之西北太平洋水氣溫度年際變化(1979-2003)



(b) MRI-AGCM 之西北太平洋水氣溫度年際變化(2075-2099)

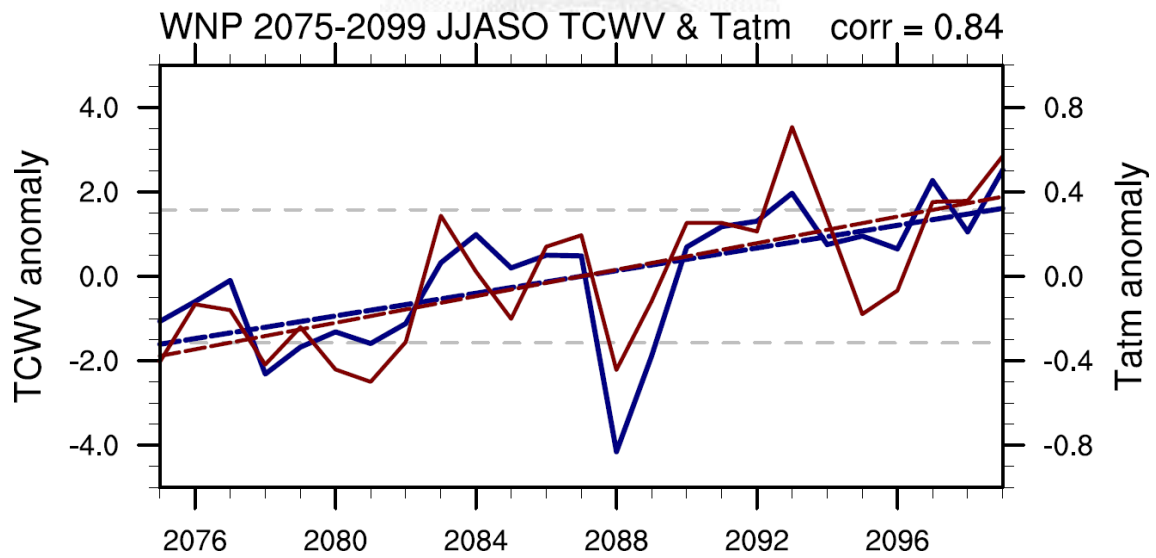
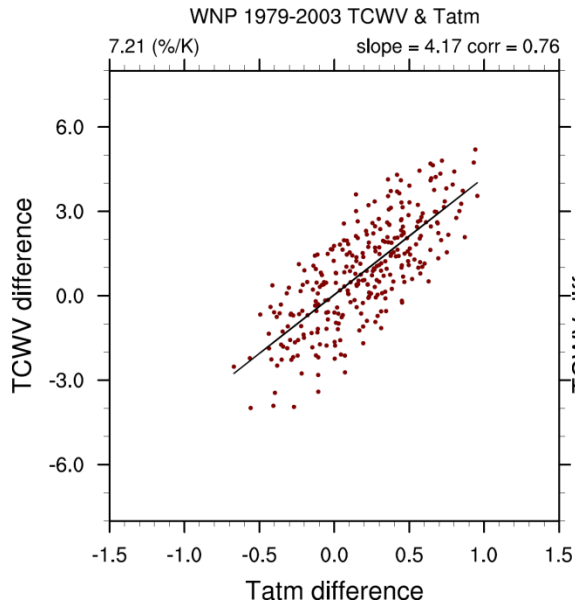
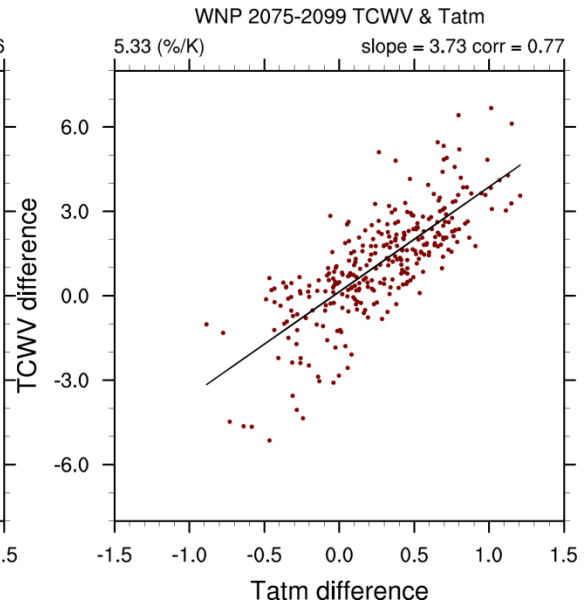


圖 3-12：MRI-AGCM 西北太平洋季平均年際變化，藍線為總水氣量（灰線為 1 個標準差），紅線為大氣平均溫度，右上為相關係數，(a) 模式現在 1979-2003，(b) 模式未來 2075-2099。

(a) 西北太平洋迴歸分析(1979-2003)



(b) 西北太平洋迴歸分析(2075-2099)



(c) 西北太平洋迴歸分析(1979-2003, 2075-2099)

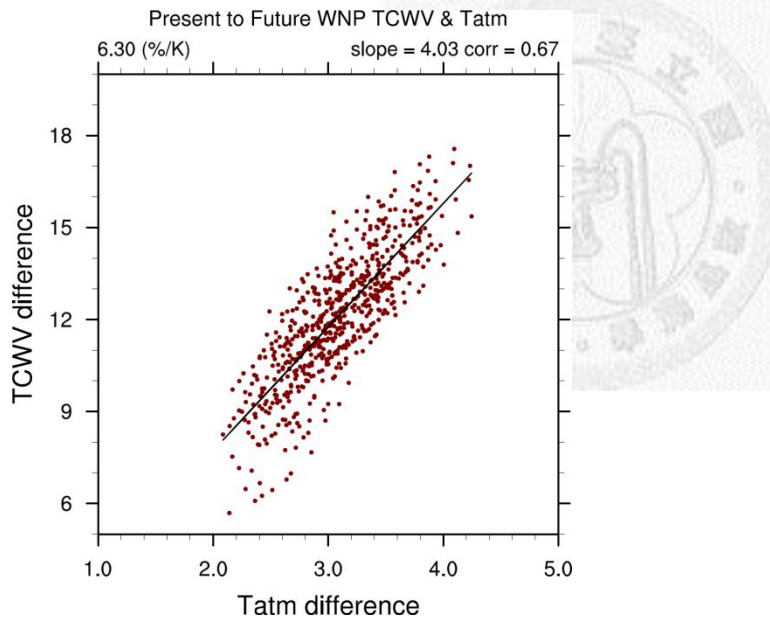
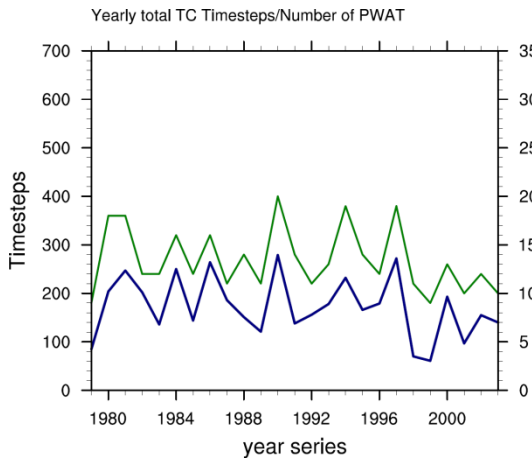


圖 3-13：MRI-AGCM 西北太平洋年際相減迴歸分析，標題下由左至右依序為：水氣增加率、迴歸直線斜率、相關係數，(a) 模式現在(1979-2003)，(b) 模式未來(2075-2099)，(c) 模式未來現在差距(1979-2003, 2075-2099)。

(a) MRI-AGCM(1979-2003)資料數



(b) MRI-AGCM(2075-2099)資料數

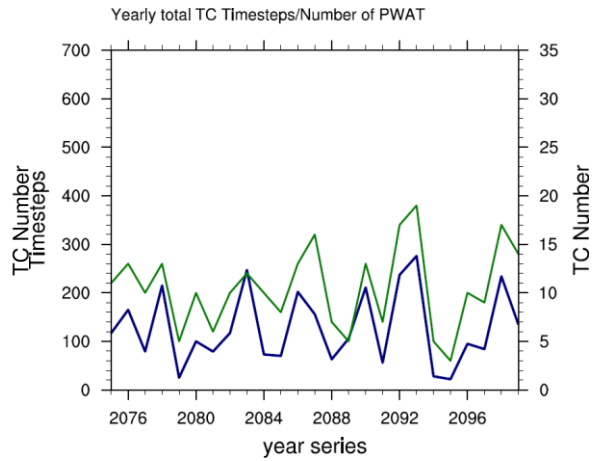
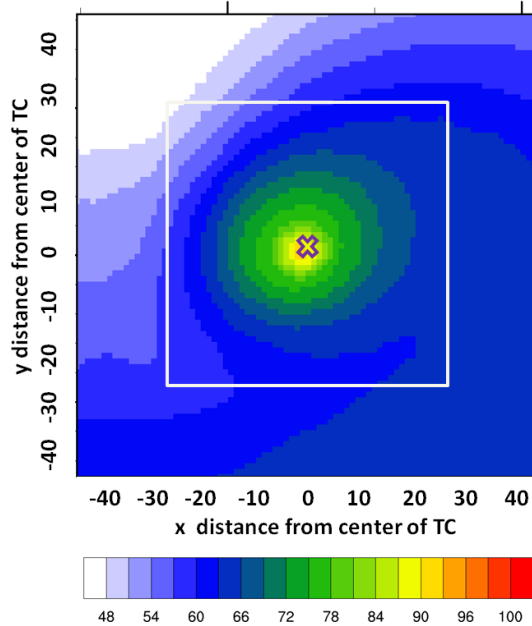


圖 3-14：所有颱風(所有強度)每年的個案資料數，藍線代表時間點數(time-steps)，綠線代表颱風數，(a) MRI-AGCM (1979-2003)，(b) MRI-AGCM (2075-2099)。

(a) MRI-AGCM(1979-2003)水氣平均



(b) MRI-AGCM(2075-2099)水氣平均

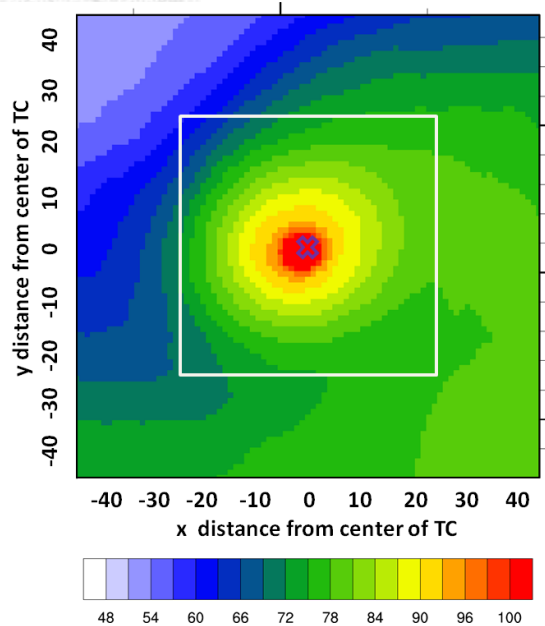
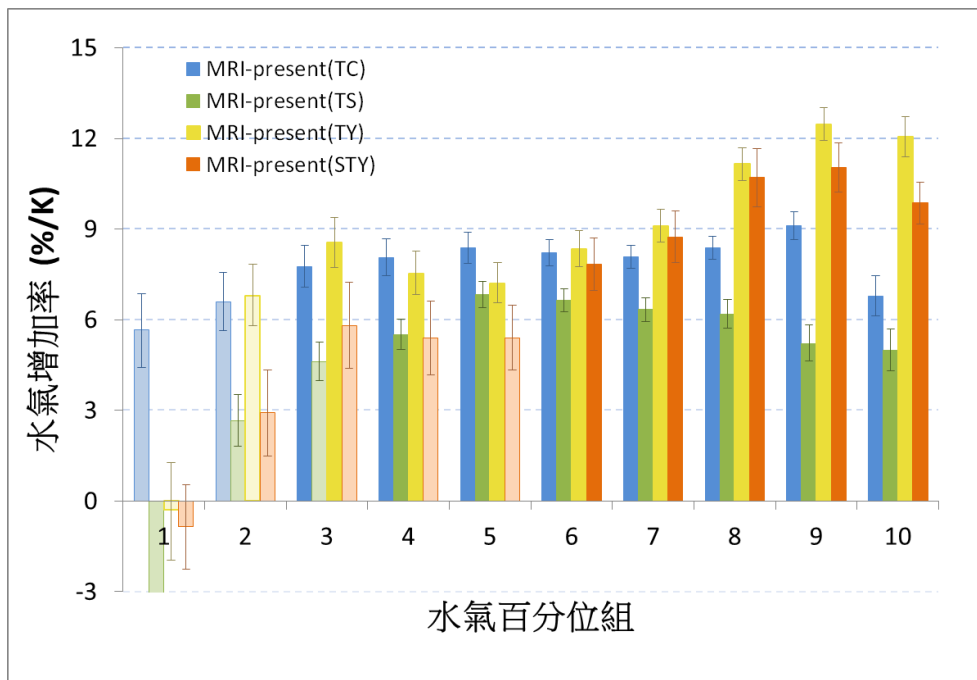


圖 3-15：所有颱風個案總水氣量平均結果，縱軸與橫軸皆為距離中心的網格式，方框示意颱風範圍，(a) MRI-AGCM (1979-2003)，(b) MRI-AGCM (2075-2099)。

(a) MRI-AGCM (1979-2003) 颱風水氣增加率



(b) MRI-AGCM (2075-2099) 颱風水氣增加率

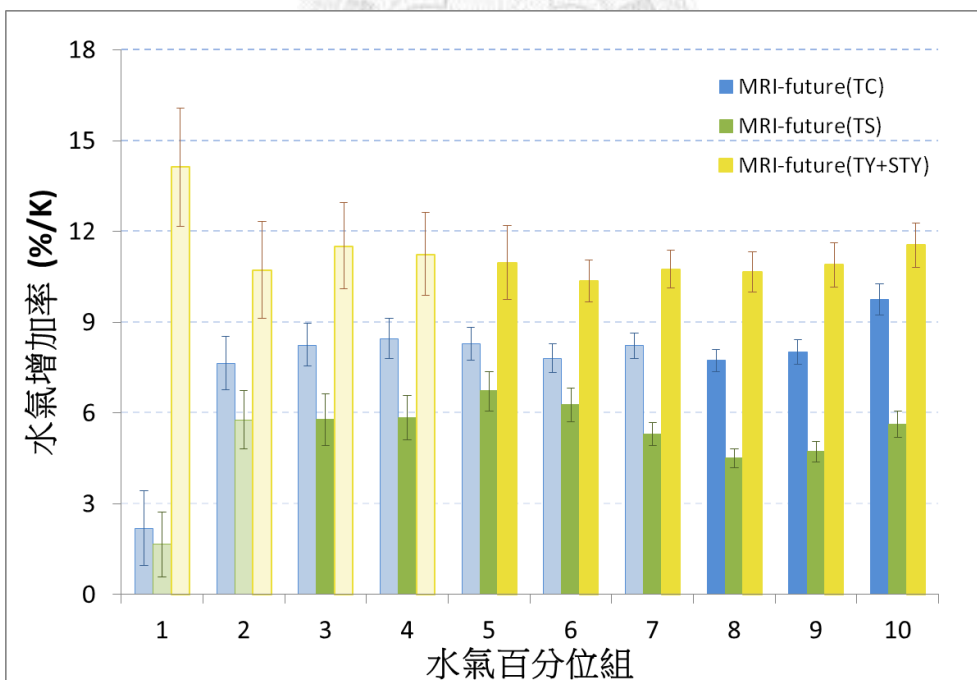
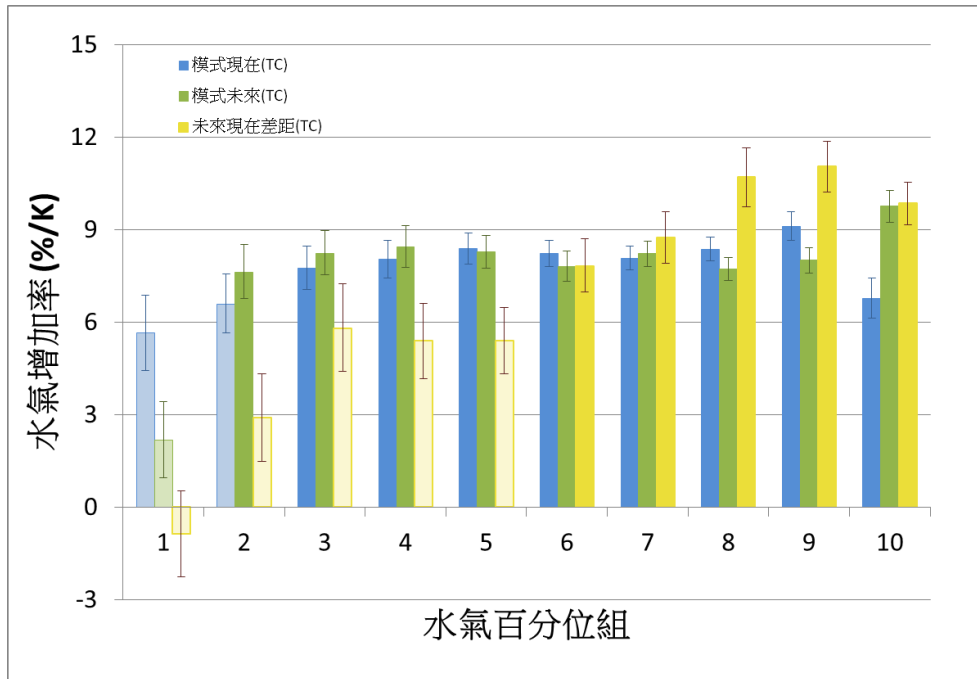


圖 3-16：年際相減法結果。縱軸為颱風水氣增加率，橫軸為颱風水氣百分位組（由小至大每組 10%）。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。(a) 為 MRI-AGCM (1979-2003)，(b) 為 MRI-AGCM (2075-2099)。

(a) MRI-AGCM 颱風水氣增加率



(b) MRI-AGCM 弱颱風水氣增加率

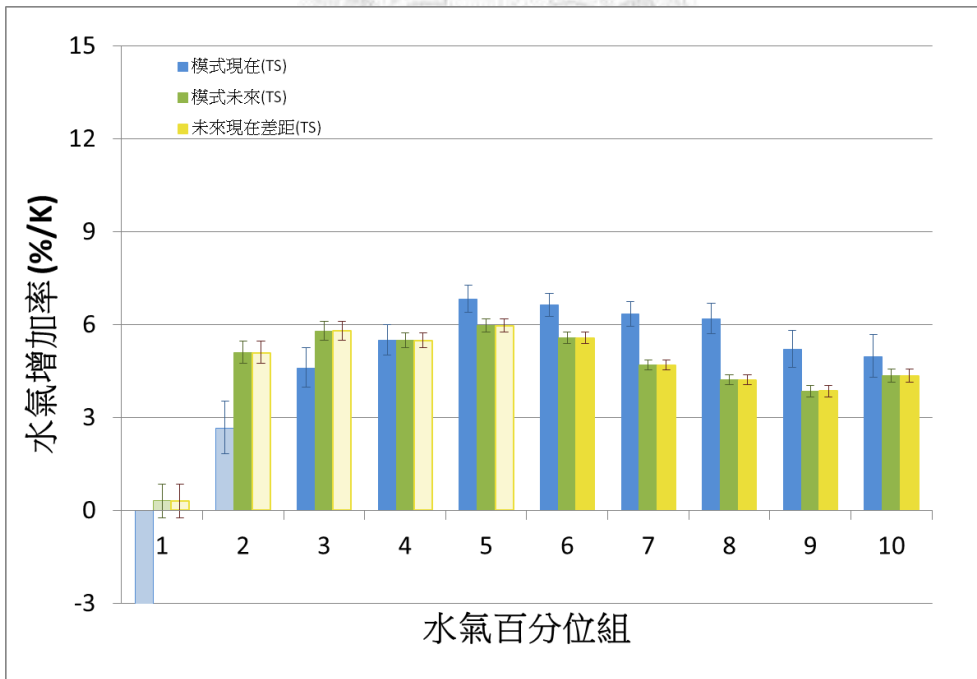


圖 3-17：年際相減法結果。縱軸為颱風水氣增加率，橫軸為颱風水氣百分位組（由小至大每組 10%）。三種顏色為模式現在（1979-2003）、模式未來（2075-2099）、未來現在差距（1979-2003, 2075-2099），淺色代表未通過檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。(a) 為颱風(所有強度)，(b) 為弱颱風等級。

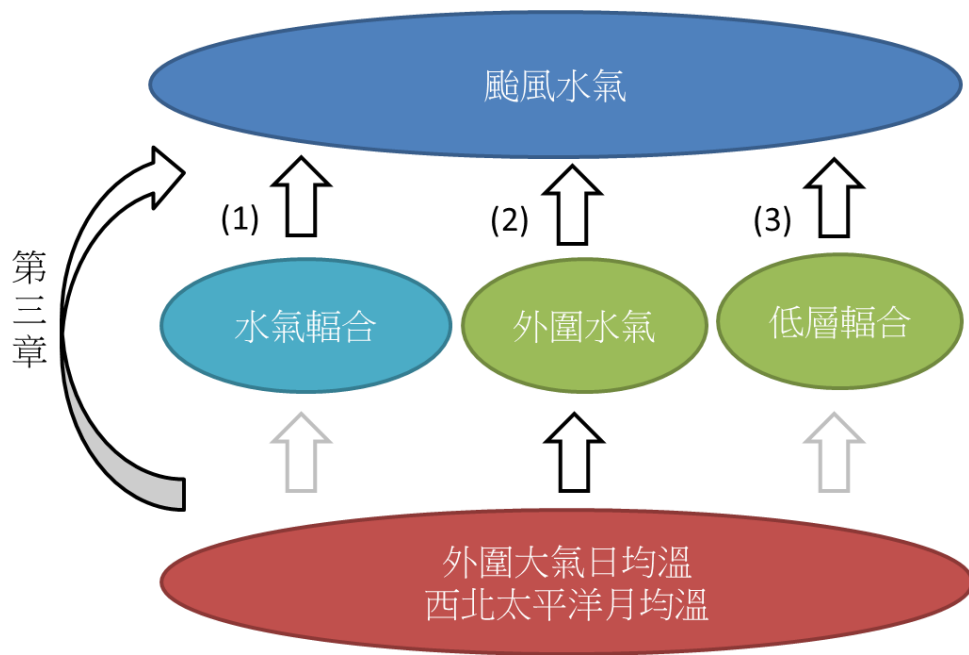


圖 4-1：第四章分析水氣輻合概念示意圖。第三章已分析大氣溫度對颱風水氣的影響，第四章將透過(1)颱風水氣輻合、(2)颱風外圍水氣、(3)颱風低層輻合三者和大氣溫度以及颱風水氣的關係，已了解大氣溫度如何透過水氣輻合改影響颱風水氣。大氣溫度又分為颱風外圍大氣日均溫，和西北太平洋月均溫，只與外圍水氣相關較高。

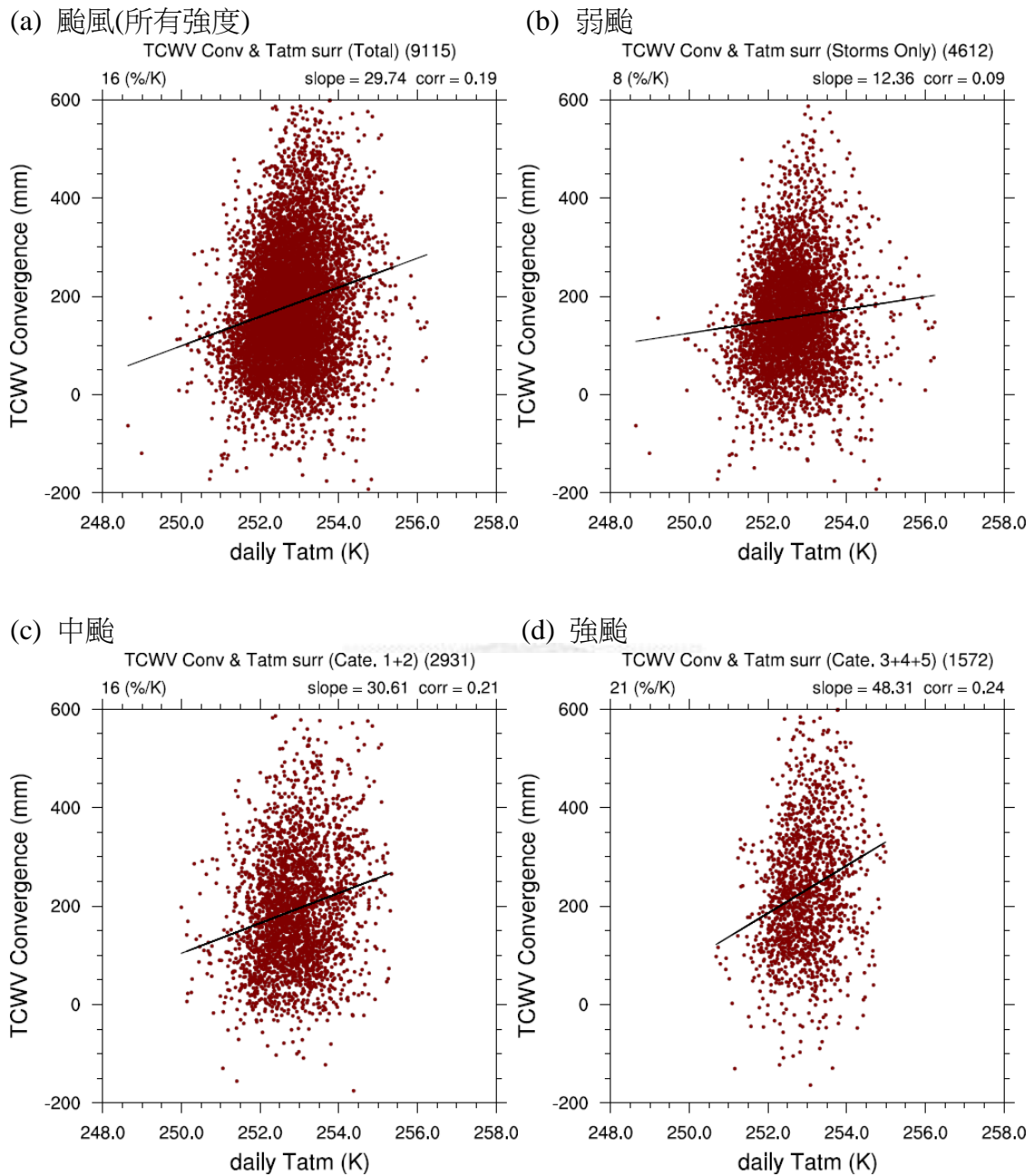
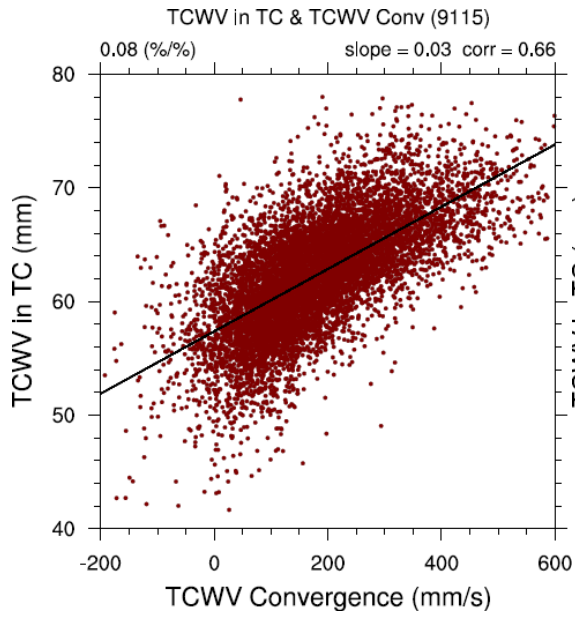
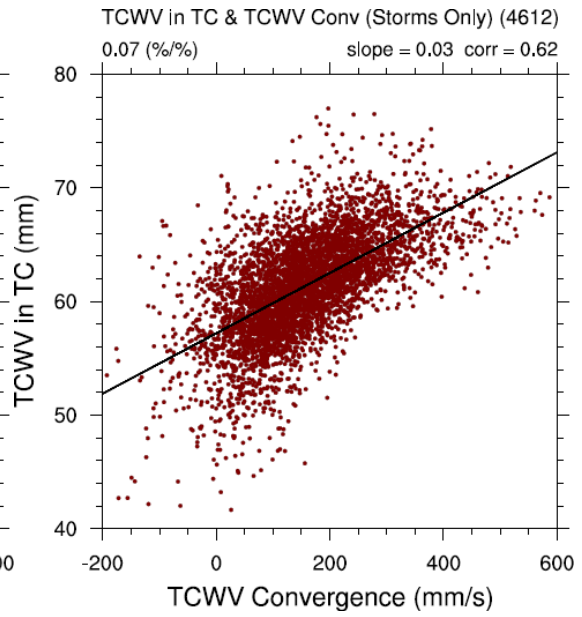


圖 4-2：颱風水氣輻合與日尺度颱風外圍大氣溫度的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱風等級，(c) 中颱風等級，(d) 強颱風等級。

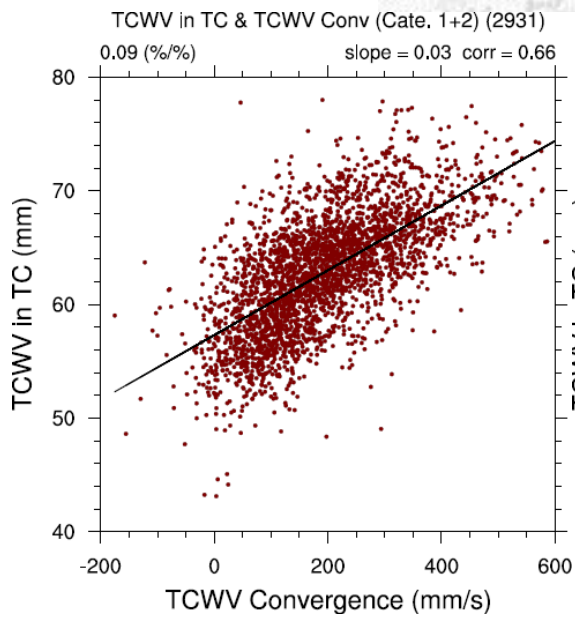
(a) 颱風(所有強度)



(b) 弱颱



(c) 中颱



(d) 強颱

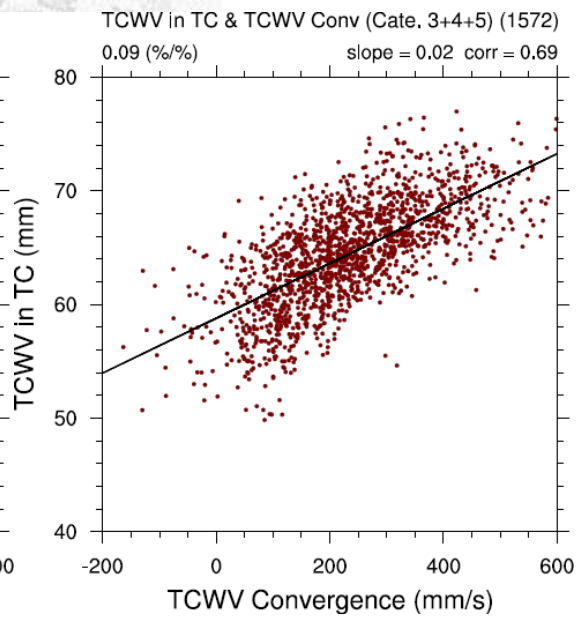


圖 4-3：颱風水氣與颱風水氣輻合的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱等級，(c) 中颱等級，(d) 強颱等級。

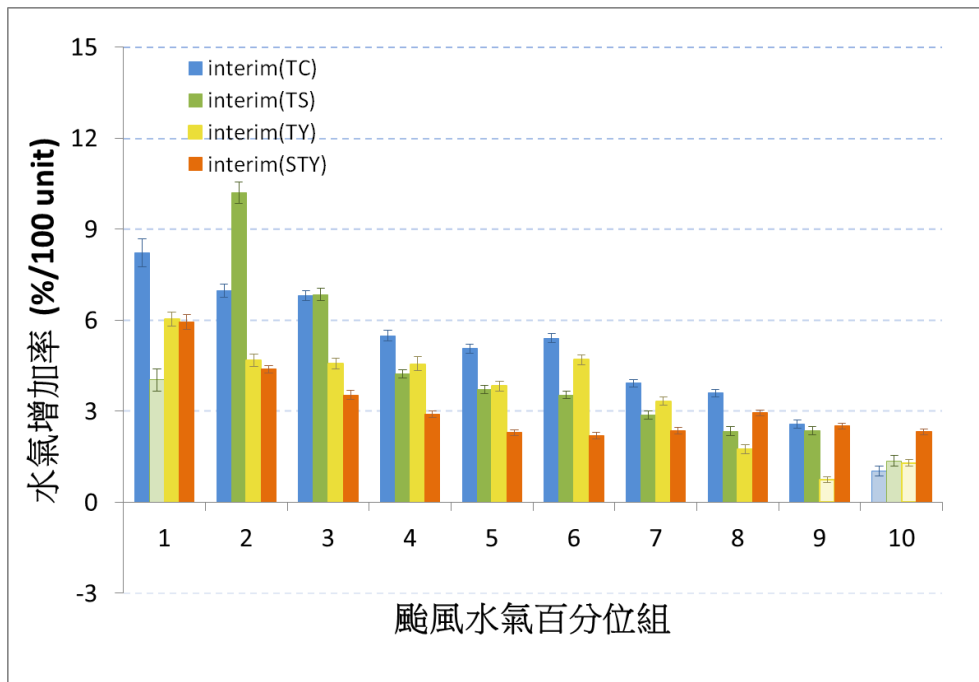
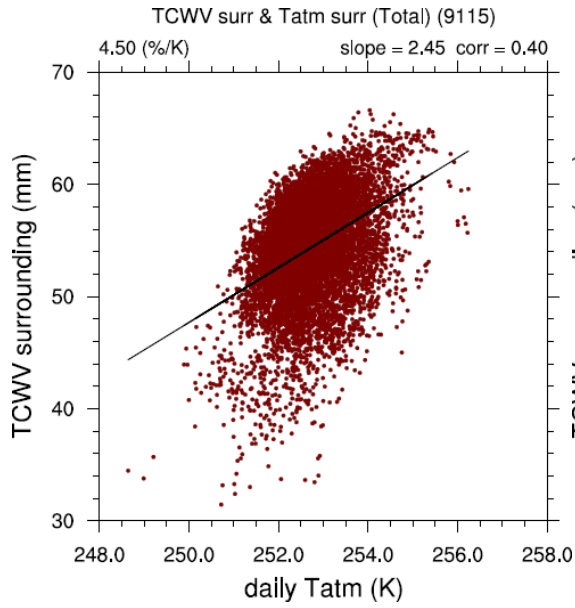
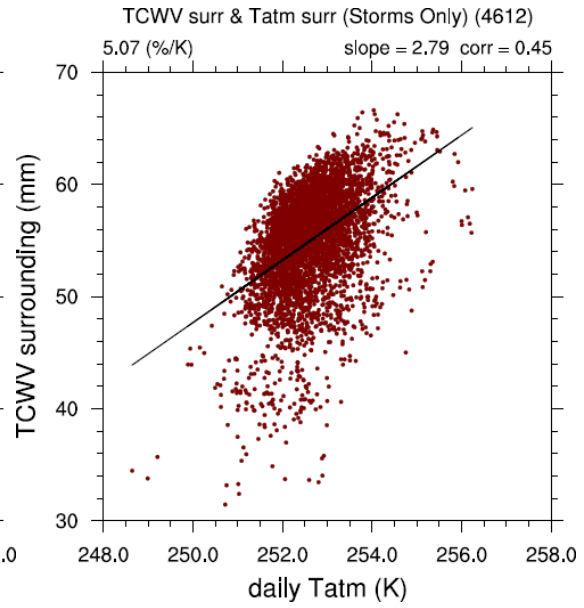


圖 4-4：颱風水氣和水氣輻合之年際相減迴歸分析。縱軸為颱風水氣增加率，代表每增加 100 單位(mm/s)的水氣輻合，颱風水氣增加的百分比，橫軸為颱風水氣百分位組（由小至大每組 10 %）。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。

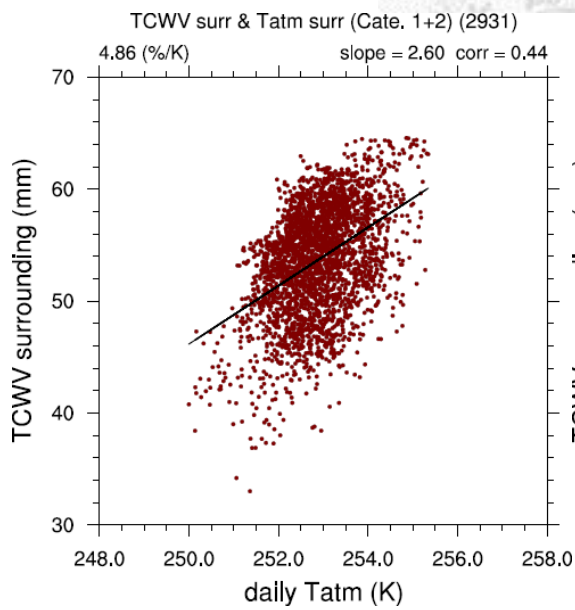
(a) 颱風(所有強度)



(b) 弱颱風



(c) 中颱風



(d) 強颱風

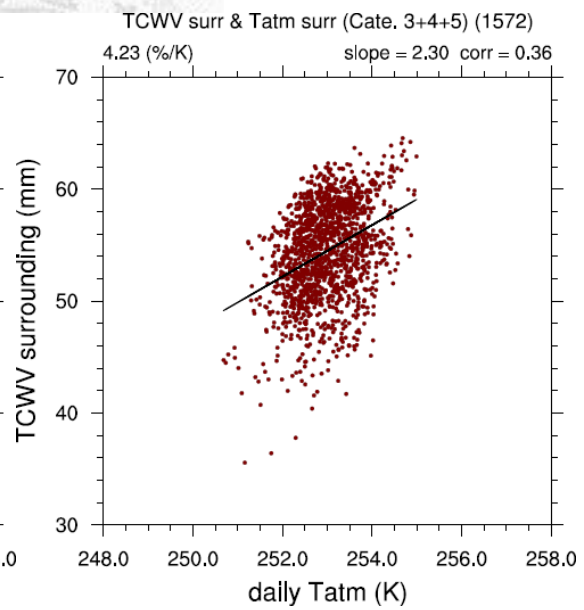
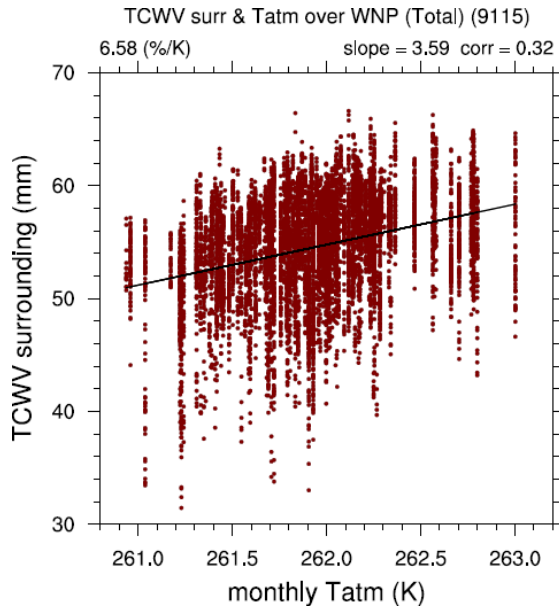
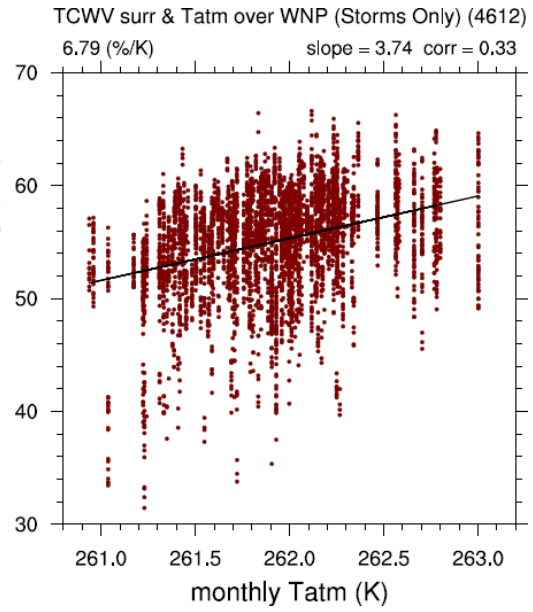


圖 4-5：颱風外圍水氣與颱風外圍大氣日均溫的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱風等級，(c) 中颱風等級，(d) 強颱風等級。

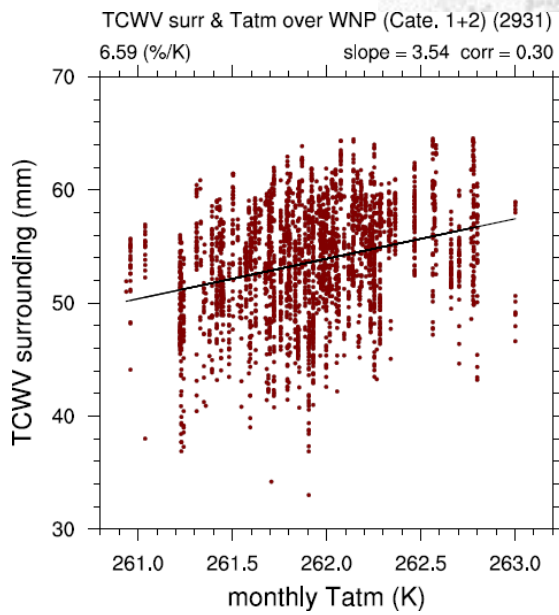
(a) 颱風(所有強度)



(b) 弱颱風



(c) 中颱風



(d) 強颱風

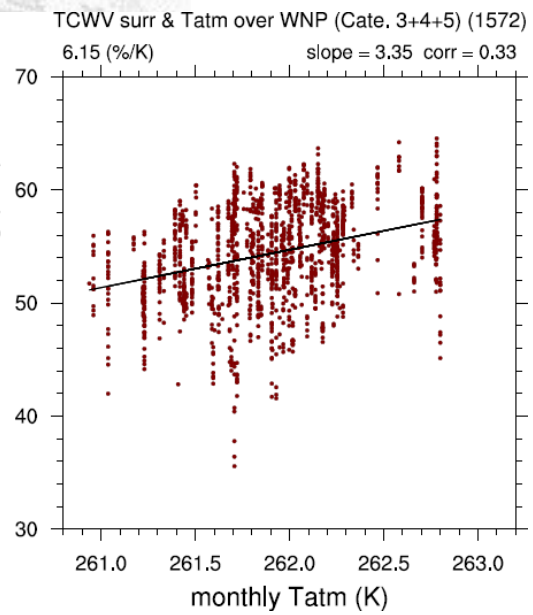


圖 4-6：颱風外圍水氣與西北太平洋大氣月均溫的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱風等級，(c) 中颱風等級，(d) 強颱風等級。

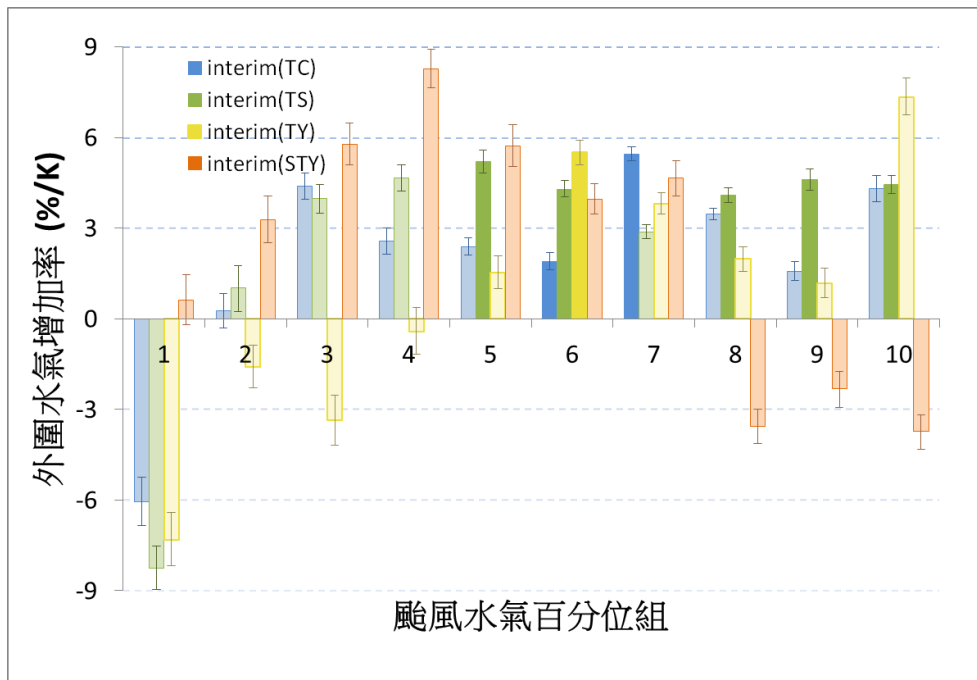
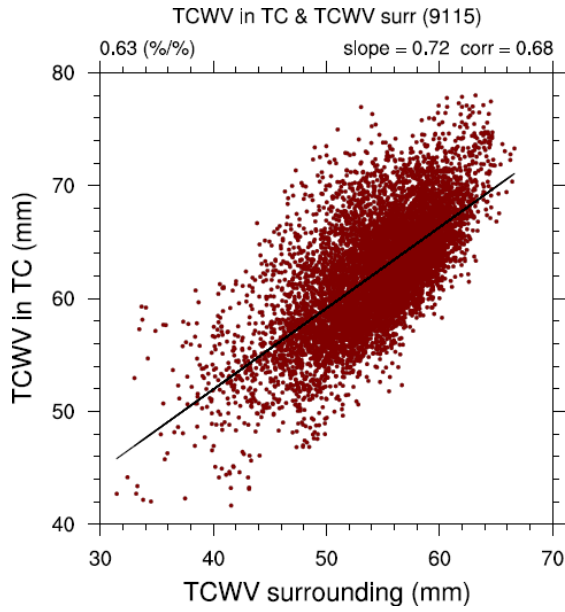
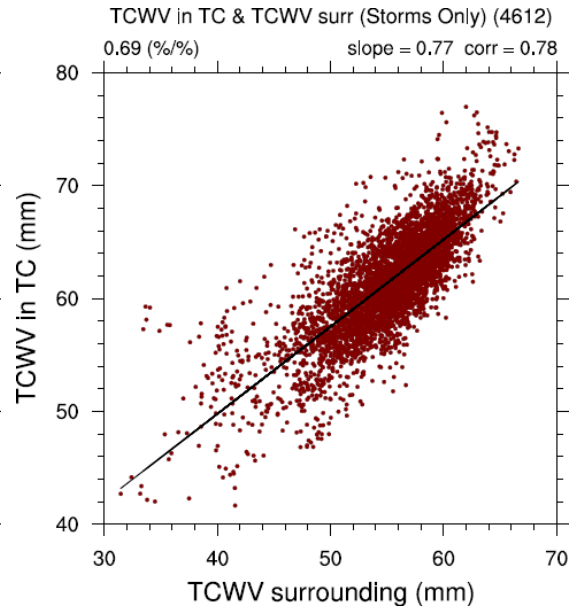


圖 4-7：颱風外圍水氣和西北太平洋大氣溫度之年際相減迴歸分析。縱軸為水氣增加率，橫軸為颱風水氣百分位組（由小至大每組 10 %）。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。

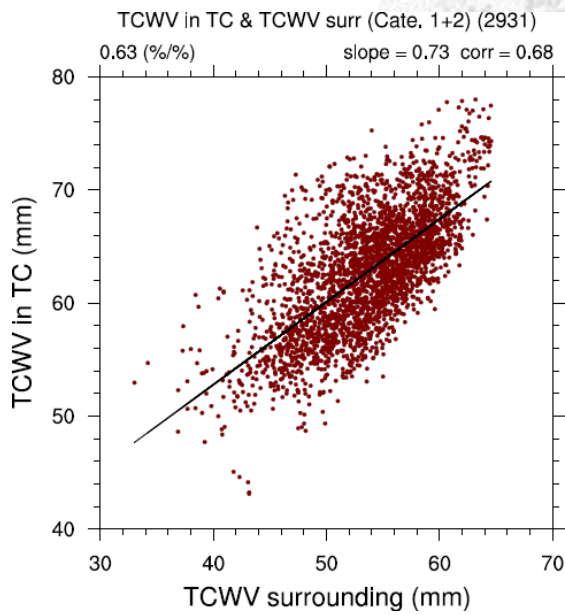
(a) 颱風(所有強度)



(b) 弱颱



(c) 中颱



(d) 強颱

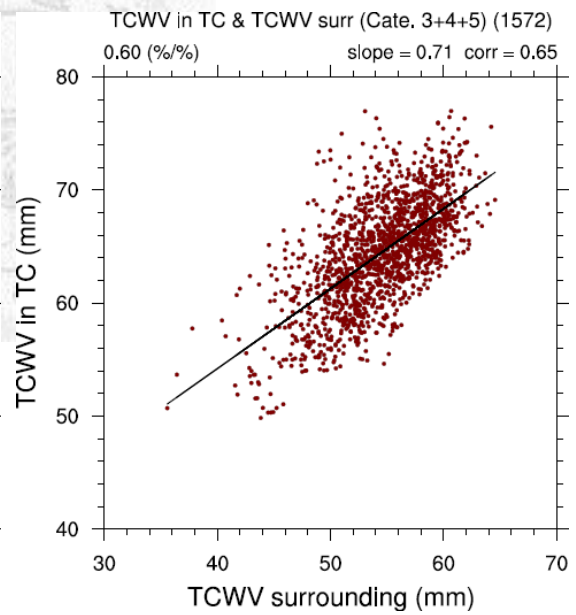


圖 4-8：颱風水氣與颱風外圍水氣的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱等級，(c) 中颱等級，(d) 強颱等級。

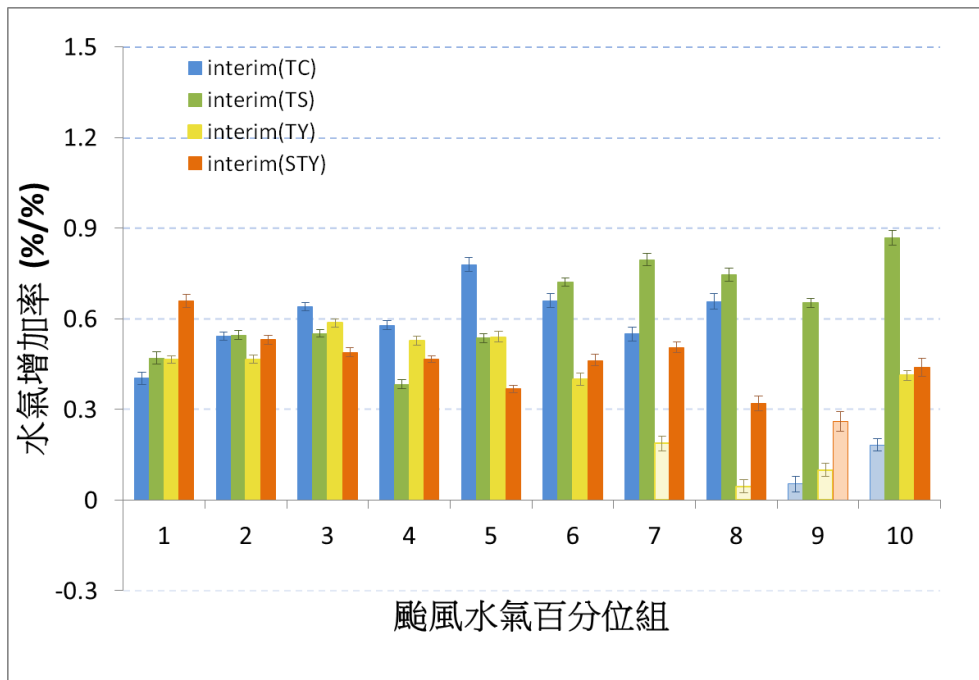


圖 4-9：颱風水氣和外圍水氣之年際相減迴歸分析。縱軸為水氣增加率，橫軸為颱風水氣百分位組（由小至大每組 10 %）。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。

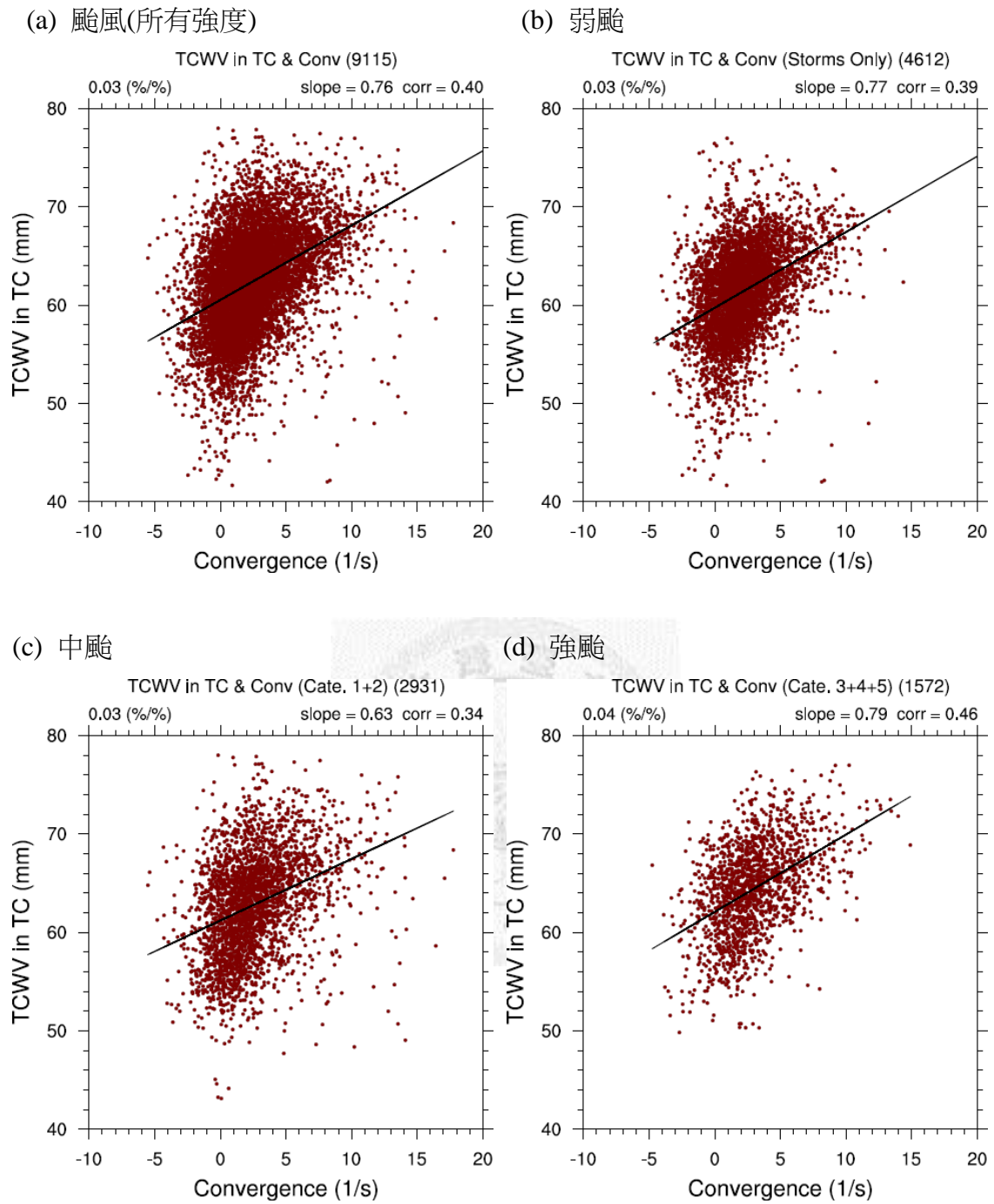


圖 4-10：颱風水氣與颱風 850hPa 輻合的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱風等級，(c) 中颱風等級，(d) 強颱風等級。

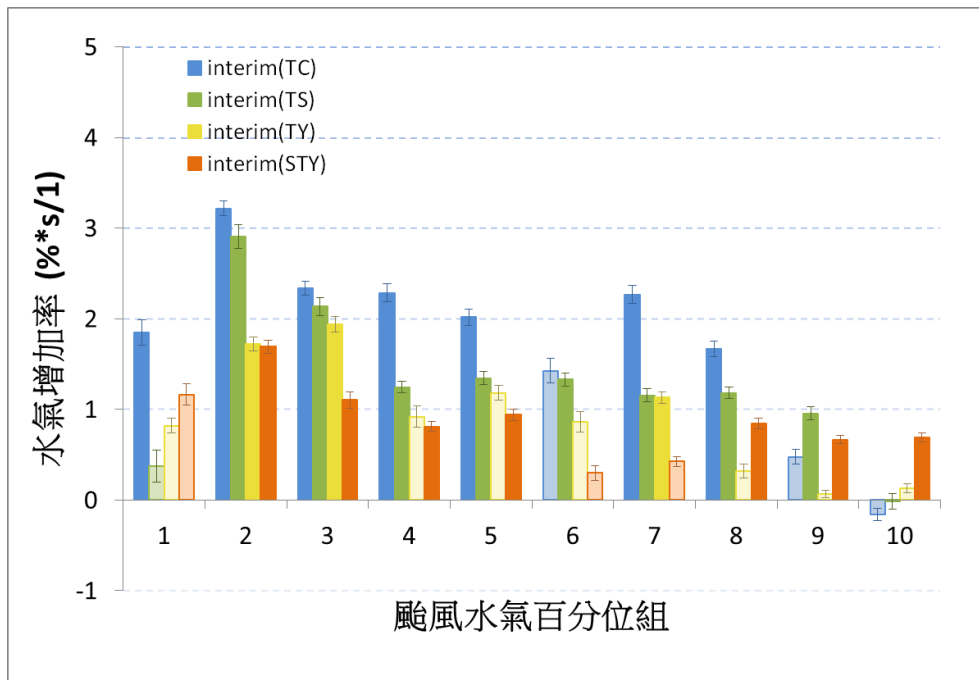
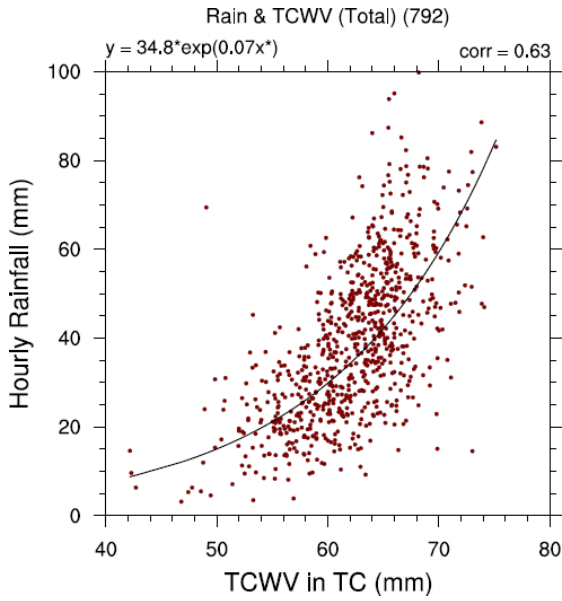
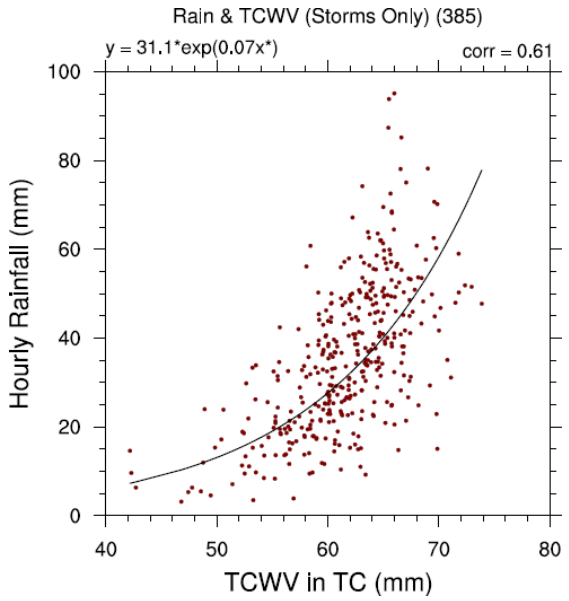


圖 4-11：颱風水氣和颱風低層輻合之年際相減迴歸分析。縱軸為水氣增加率，橫軸為颱風水氣百分位組（由小至大每組 10 %）。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。

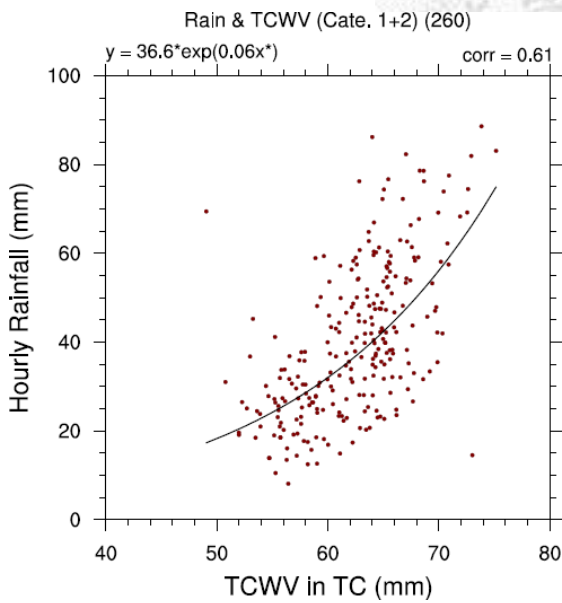
(a) 颱風(所有強度)



(b) 弱颱



(c) 中颱



(d) 強颱

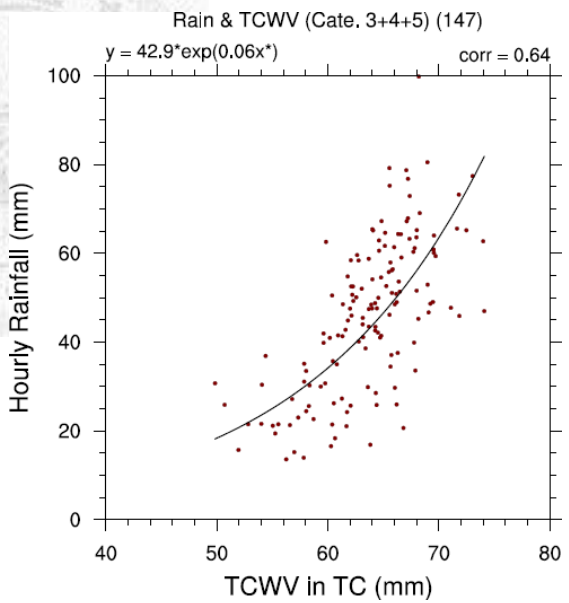
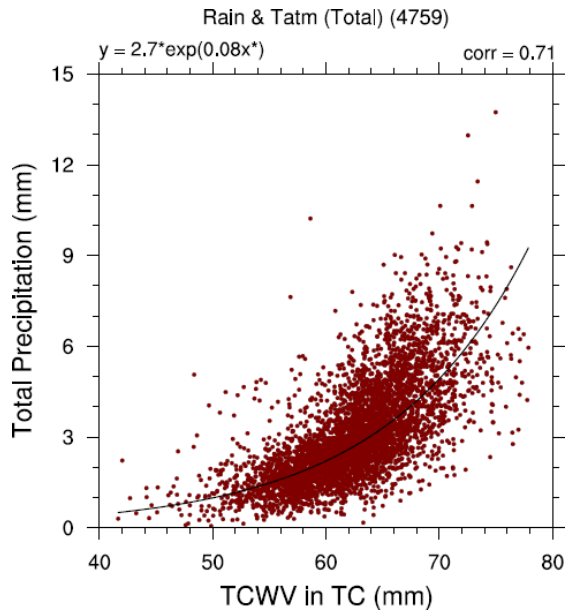
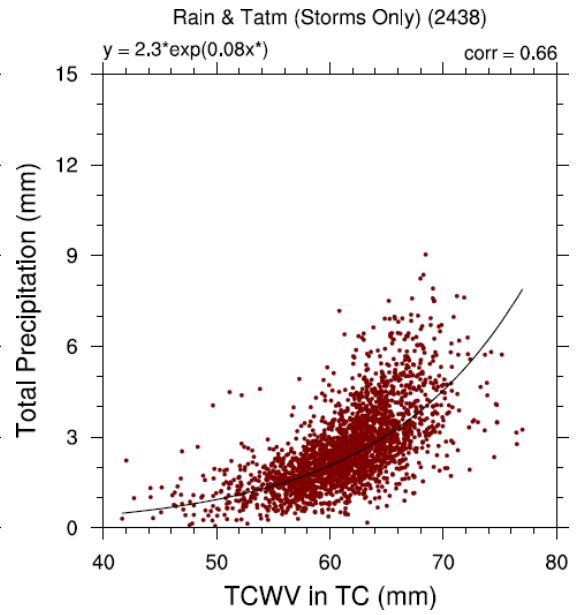


圖 4-12：颱風降水和颱風水氣迴歸分析，1998-2009 年，縱軸是 TRMM 雨量，橫軸是颱風水氣，(a) 颱風(所有強度)，(b) 弱颱，(c) 中颱，(d) 強颱。

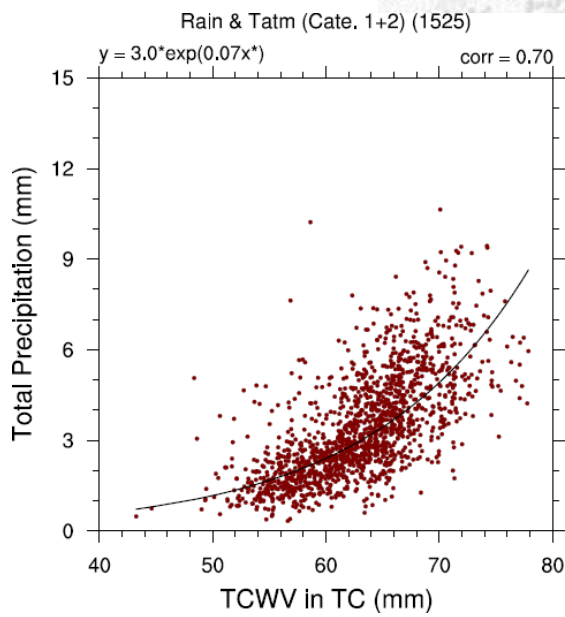
(a) 颱風(所有強度)



(b) 弱颱



(c) 中颱



(d) 強颱

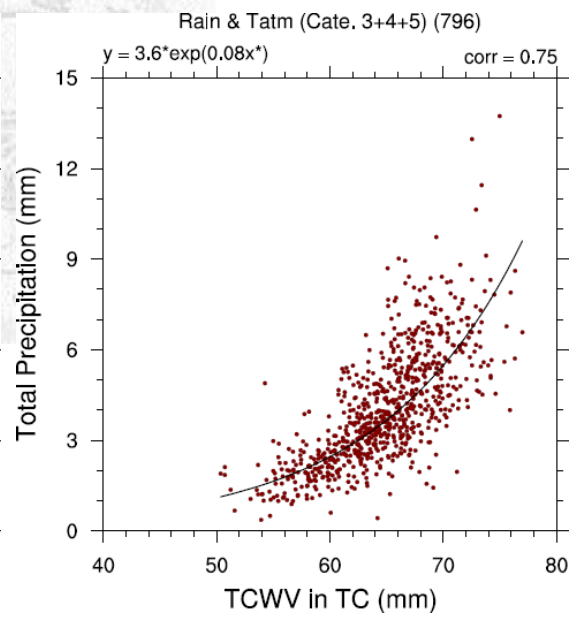
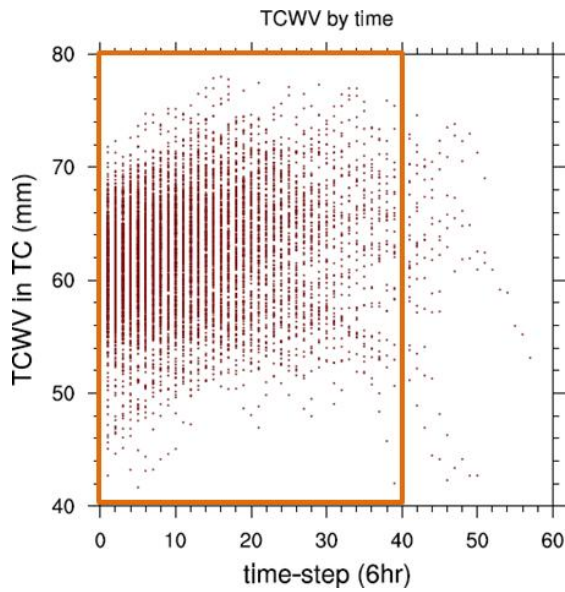
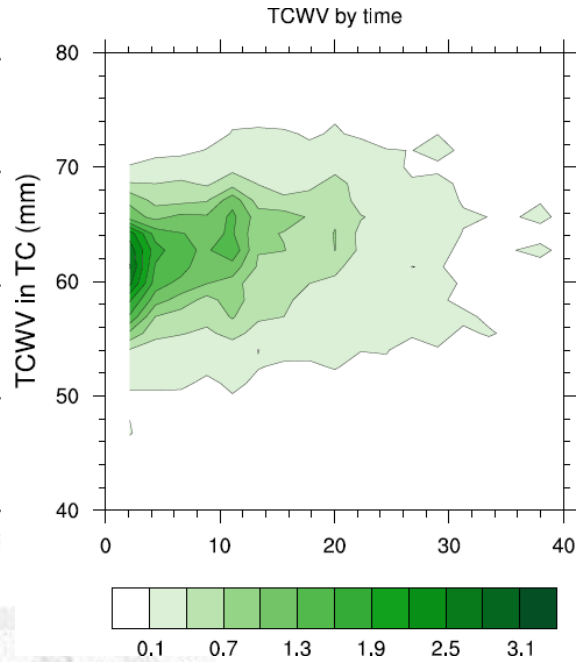


圖 4-13：颱風降水和颱風水氣迴歸分析，1979-2009 年，縱軸是 EC-interim 模式雨量，橫軸是颱風水氣，(a) 颱風(所有強度)，(b) 弱颱，(c) 中颱，(d) 強颱。

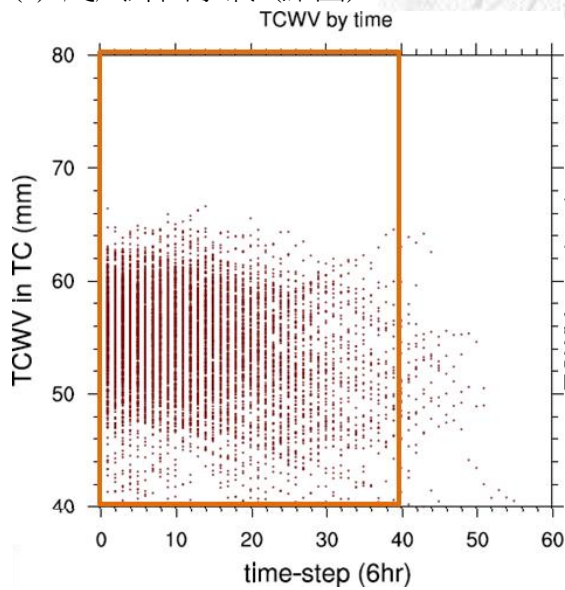
(a) 颱風水氣 (點圖)



(b) 颱風水氣 (機率密度函數)



(c) 颱風外圍水氣 (點圖)



(d) 颱風外圍水氣 (機率密度函數)

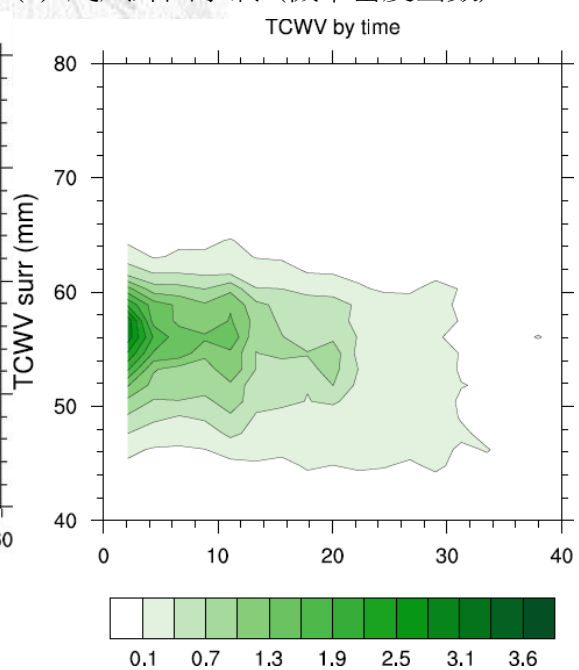
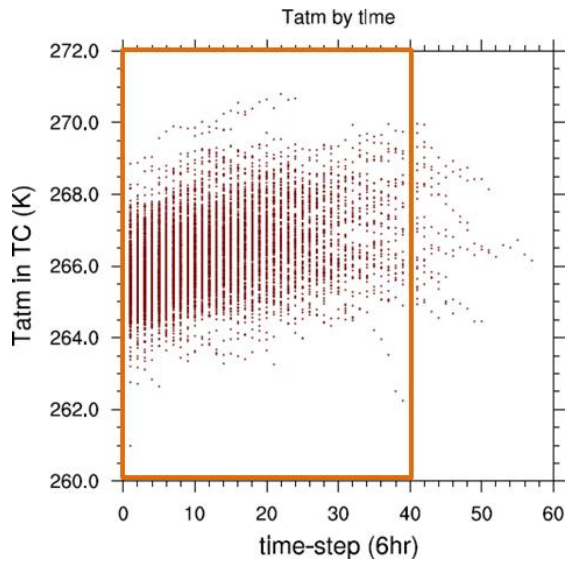
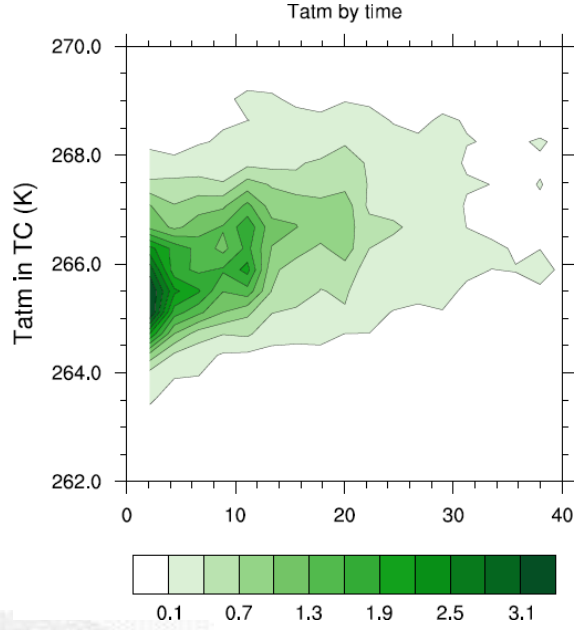


圖 4-14：1979-2009 年颱風資料，縱軸為變數，橫軸為發展時間，左圖皆為資料點圖，而右圖將以 40 個發展時間前的資料作成機率密度函數(pdf)。(a)(b) 為颱風水氣，(c)(d)為颱風外圍水氣，(e)(f)為颱風大氣溫度，(g)(h)為颱風近中心最大風速。

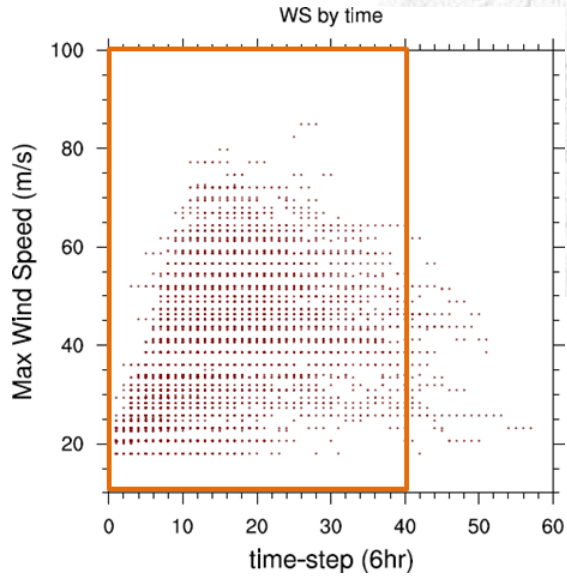
(e) 颱風溫度 (點圖)



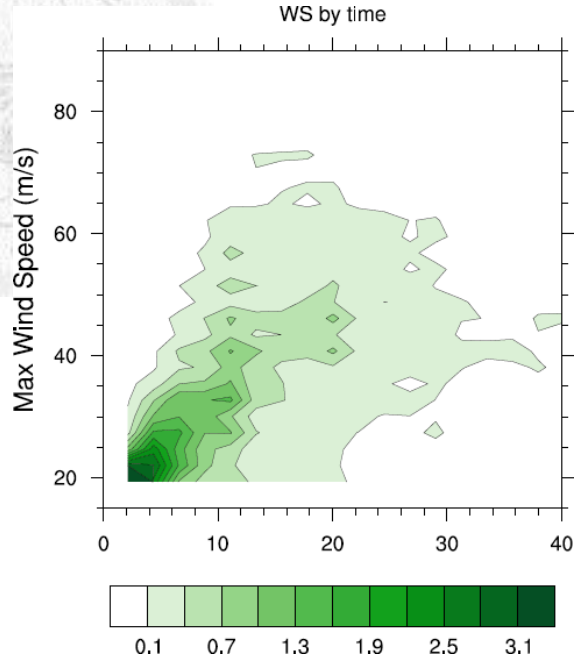
(f) 颱風溫度 (機率密度函數)



(g) 最大風速 (點圖)



(h) 最大風速 (機率密度函數)



續圖 4-14。

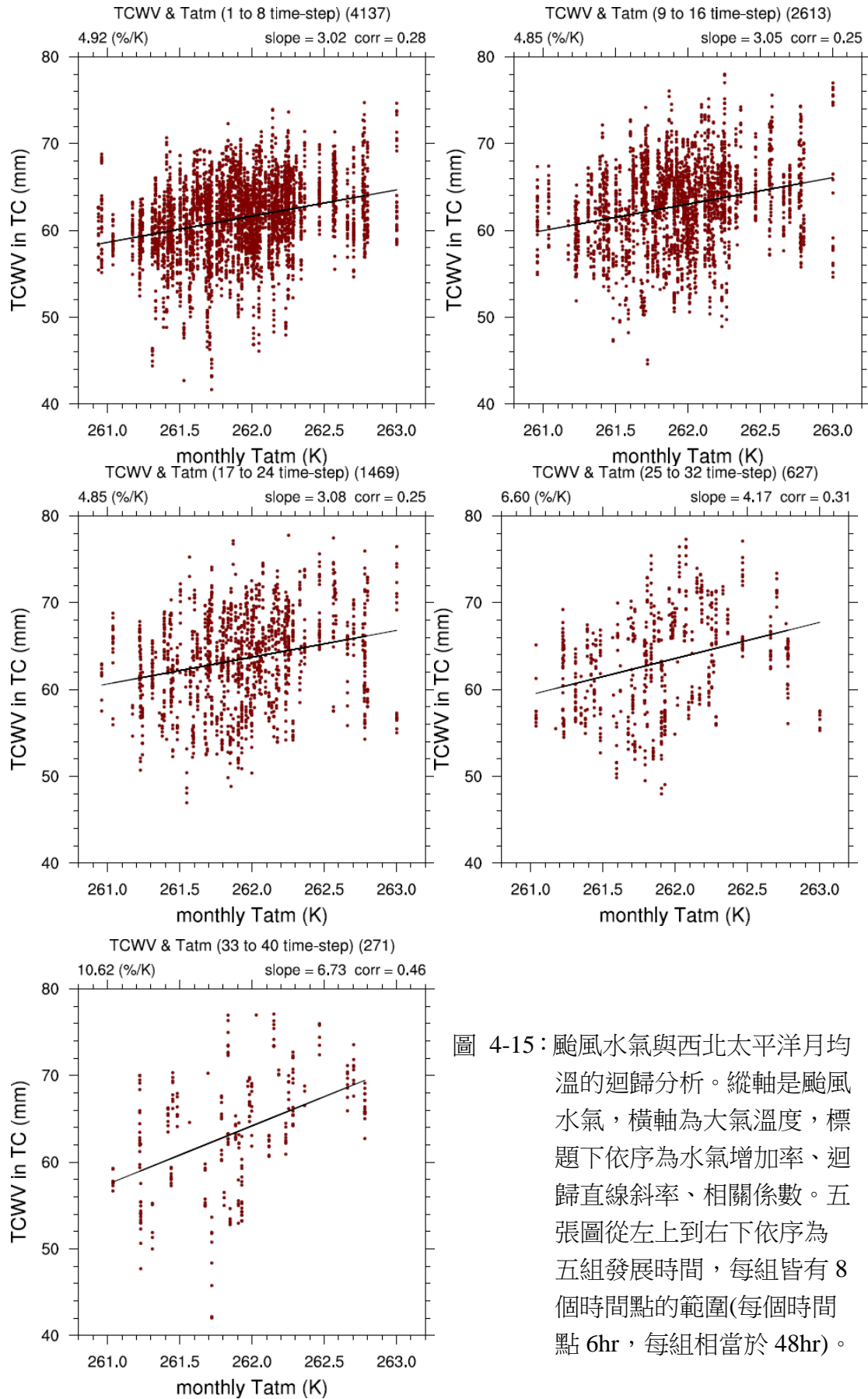


圖 4-15：颱風水氣與西北太平洋月均溫的迴歸分析。縱軸是颱風水氣，橫軸為大氣溫度，標題下依序為水氣增加率、迴歸直線斜率、相關係數。五張圖從左上到右下依序為五組發展時間，每組皆有 8 個時間點的範圍(每個時間點 6hr，每組相當於 48hr)。

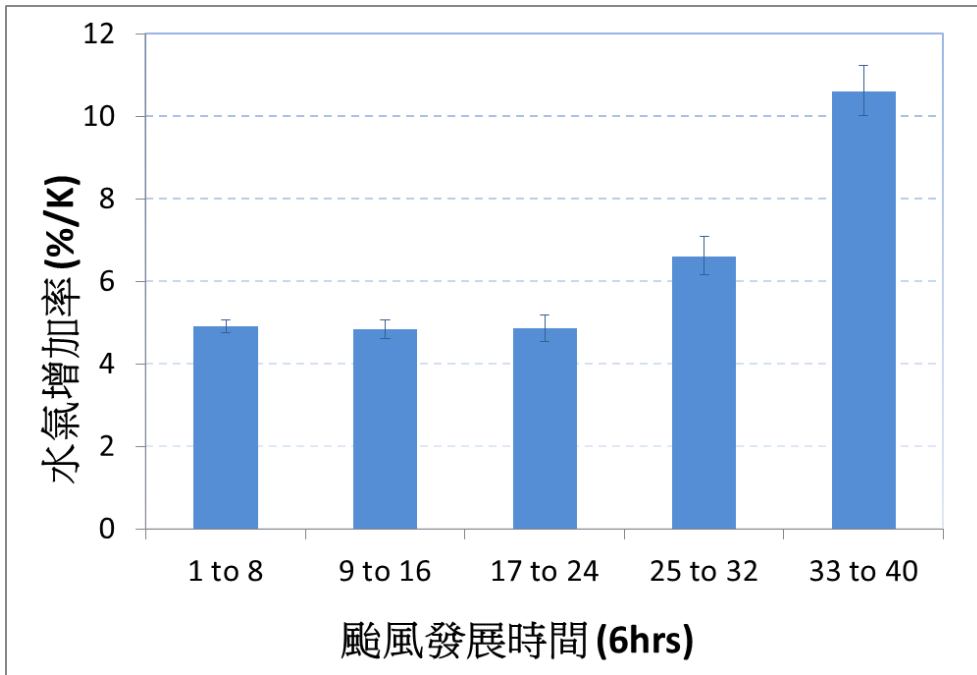
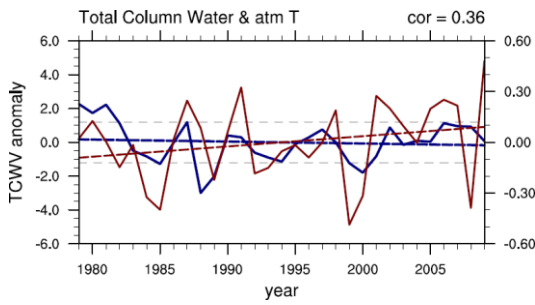


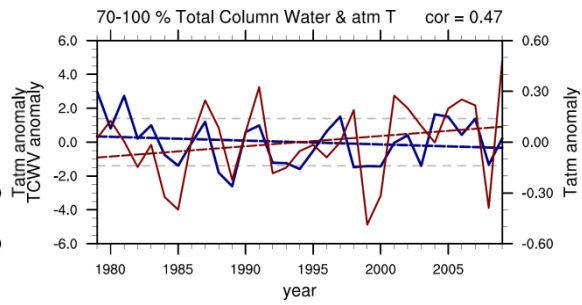
圖 4-16：颱風水氣和西北太平洋大氣溫度的迴歸分析，縱軸為水氣增加率，橫軸為五組颱風發展時間，每組 8 個時間點(相當於 48 小時)。柱頂直線代表 2 個標準差範圍。



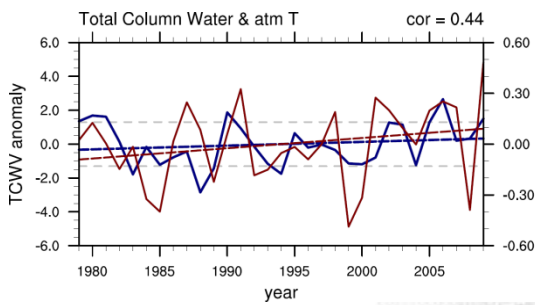
(a) 颱風水氣和大氣溫度 (0-100%)



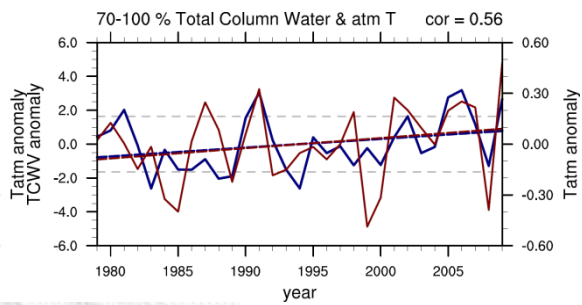
(b) 颱風水氣和大氣溫度 (70-100%)



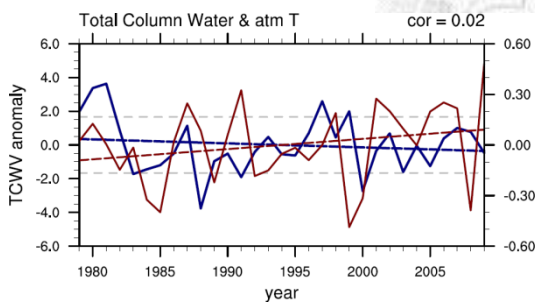
(c) 弱颱風水氣和大氣溫度 (0-100%)



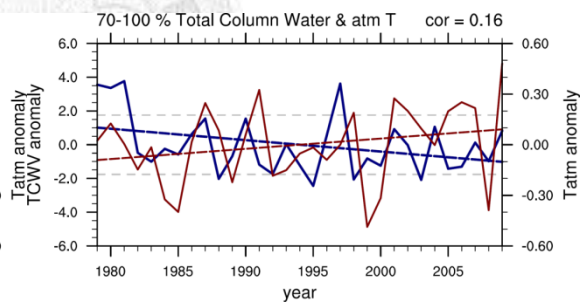
(d) 弱颱風水氣和大氣溫度 (70-100%)



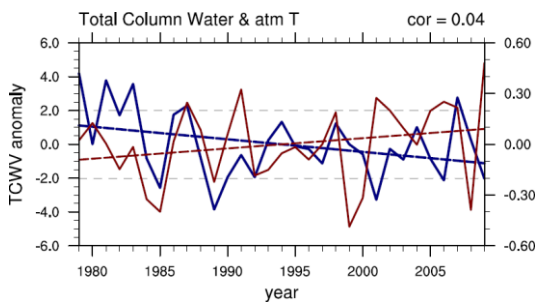
(e) 中颱風水氣和大氣溫度 (0-100%)



(f) 中颱風水氣和大氣溫度 (70-100%)



(g) 強颱風水氣和大氣溫度 (0-100%)



(h) 強颱風水氣和大氣溫度 (0-30%)

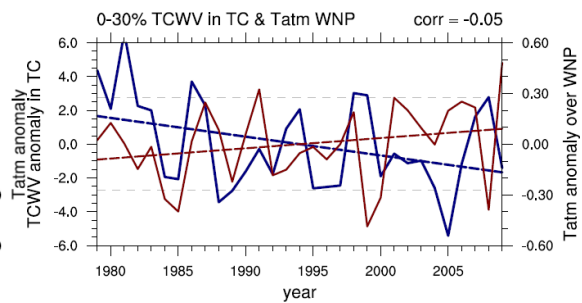


圖 5-1：颱風水氣和大氣溫度之年際變化和趨勢。藍線為颱風水氣(灰線為一個標準差)，紅線為西北太平洋大氣溫度。右上角為兩者相關係數，標題粗體加底線者代表時間趨勢通過 90% 統計檢定。由上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。

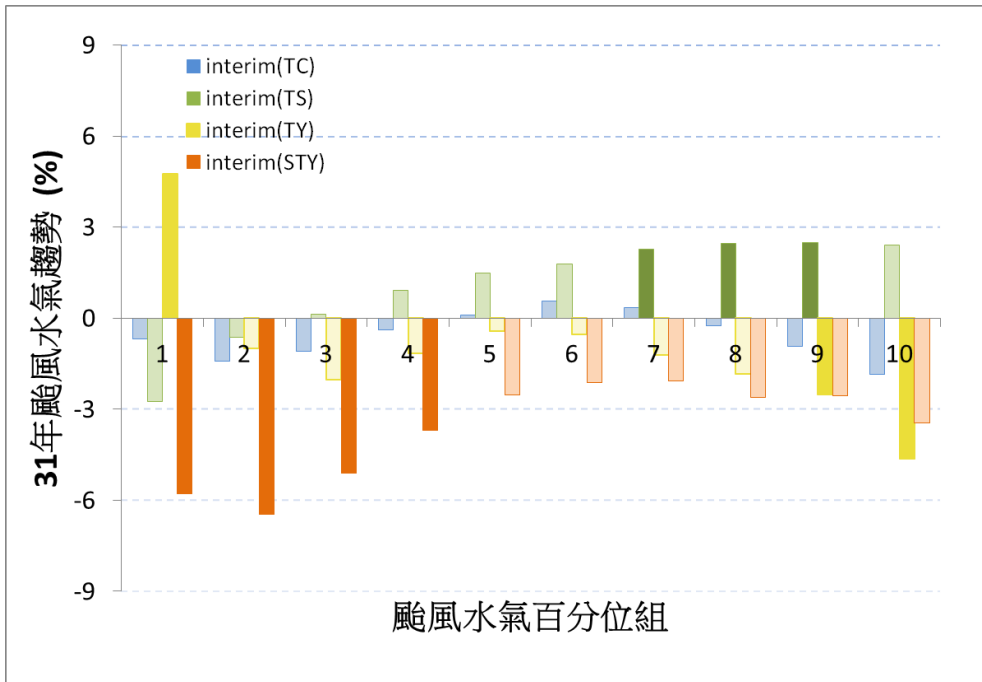
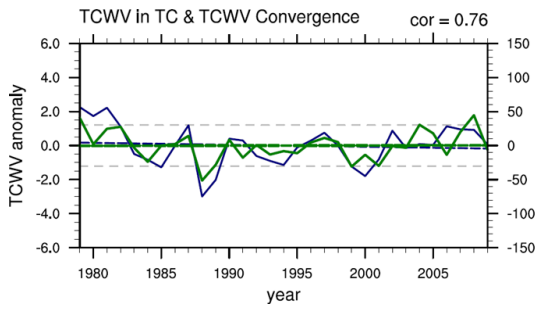
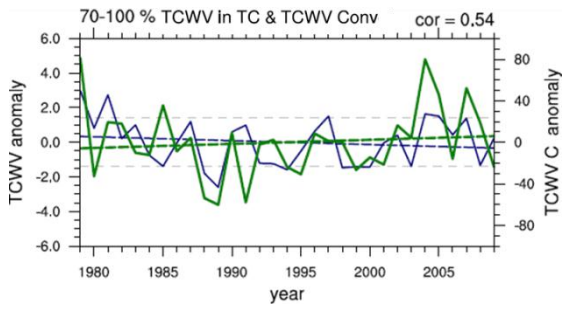


圖 5-2：颱風水氣趨勢。縱軸為水氣趨勢放大至百年的改變量，橫軸為颱風水氣百分位組（由小至大每組 10%）。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過 90% 信心水準統計檢定。

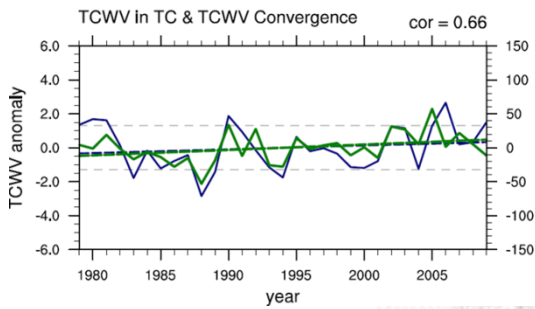
(a) 颱風水氣和水氣輻合 (0-100%)



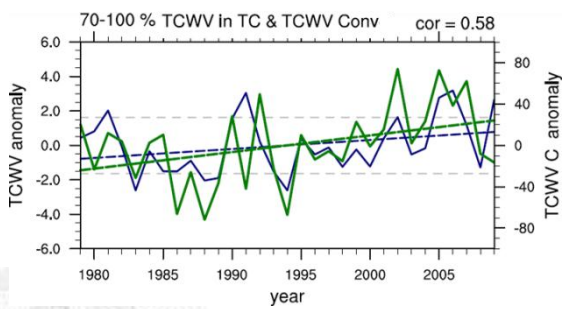
(b) 颱風水氣和水氣輻合 (70-100%)



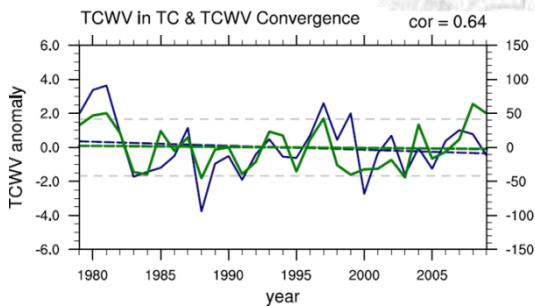
(c) 弱颱風水氣和水氣輻合 (0-100%)



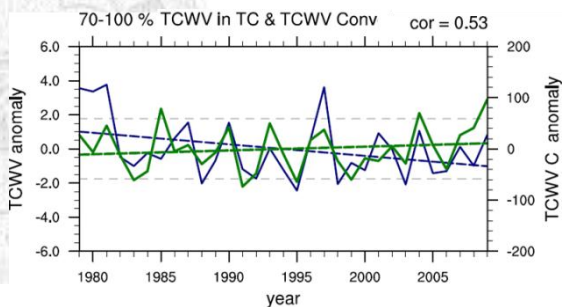
(d) 弱颱風水氣和水氣輻合 (70-100%)



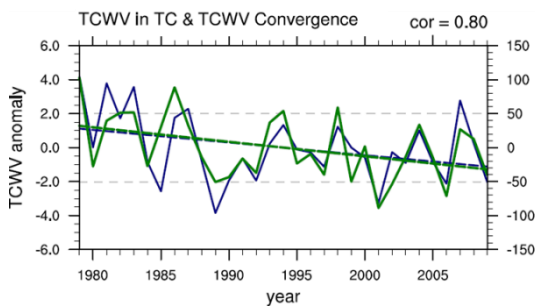
(e) 中颱風水氣和水氣輻合 (0-100%)



(f) 中颱風水氣和水氣輻合 (70-100%)



(g) 強颱風水氣和水氣輻合 (0-100%)



(h) 強颱風水氣和水氣輻合 (0-30%)

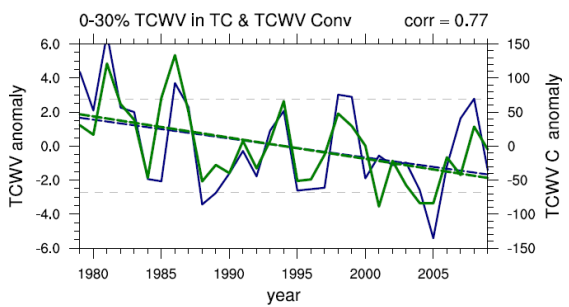


圖 5-3：颱風水氣和水氣輻合之年際變化和趨勢。藍線為颱風水氣(灰線為 1 個標準差)，綠線為颱風水氣輻合。右上角為兩者相關係數，標題粗體加底線者代表時間趨勢通過 90%統計檢定。由上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。

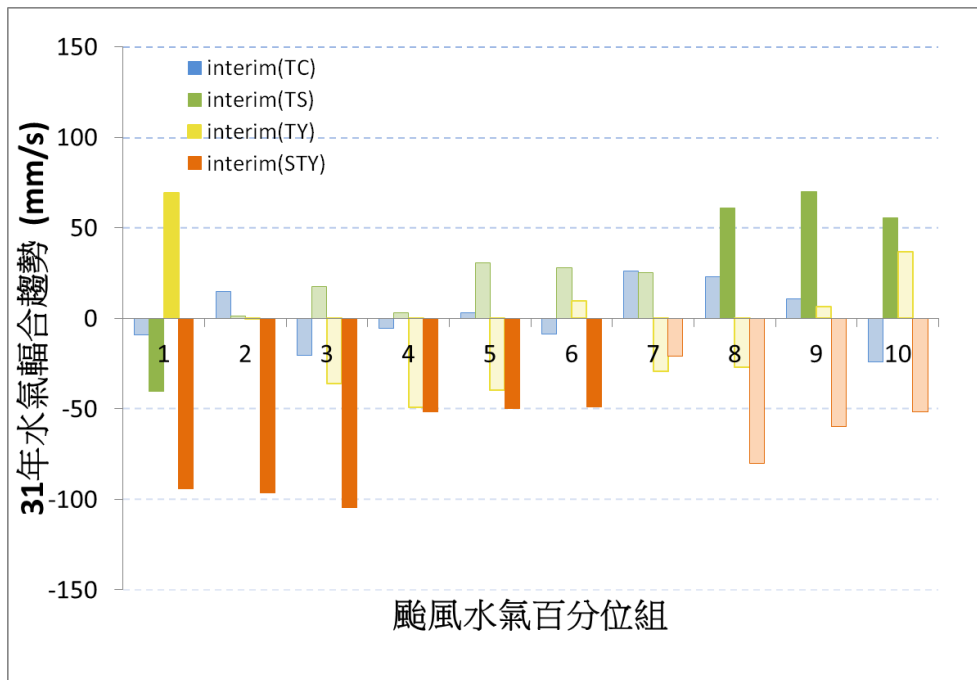
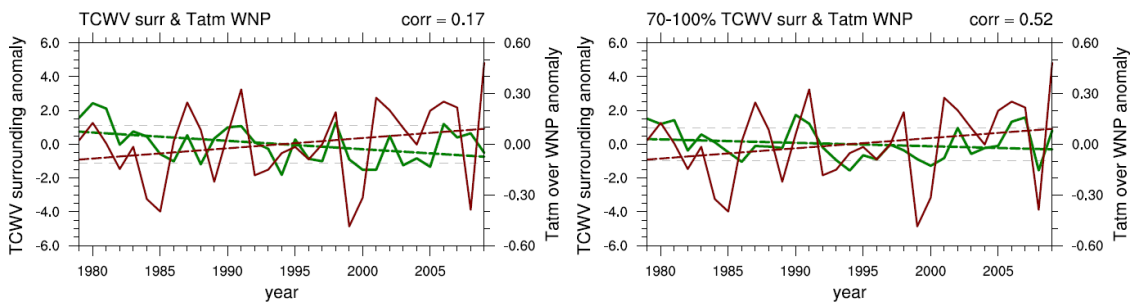
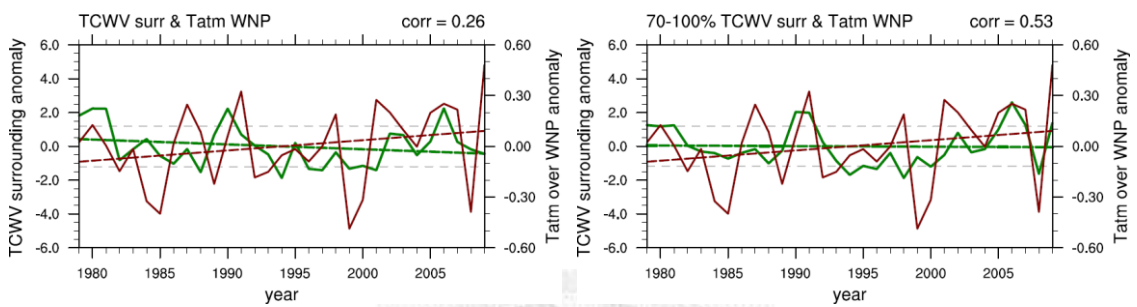


圖 5-4：颱風水氣輻合趨勢。縱軸為水氣輻合趨勢放大至百年的改變量，橫軸為颱風水氣百分位組（由小至大每組 10%）。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過 90% 信心水準統計檢定。

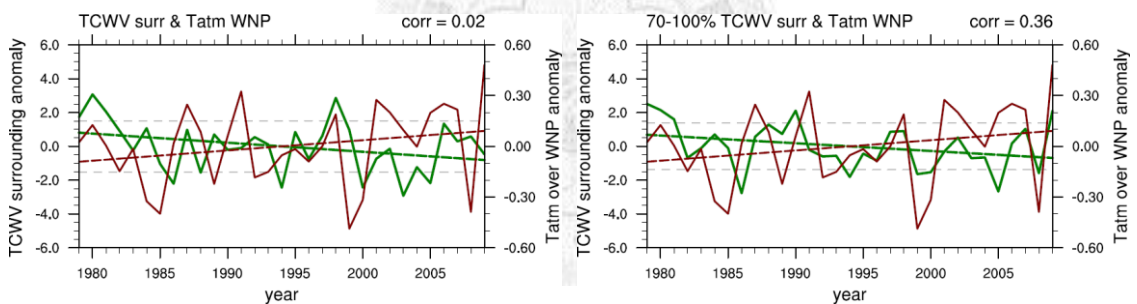
(a) 颱風外圍水氣和大氣溫度(0-100%) (b) 颱風外圍水氣和大氣溫度(70-100%)



(c) 弱颱風外圍水氣和大氣溫度(0-100%) (d) 弱颱風外圍水氣和大氣溫度(70-100%)



(e) 中颱風外圍水氣和大氣溫度(0-100%) (f) 中颱風外圍水氣和大氣溫度(70-100%)



(g) 強颱風外圍水氣和大氣溫度(0-100%) (h) 強颱風外圍水氣和大氣溫度(0-30%)

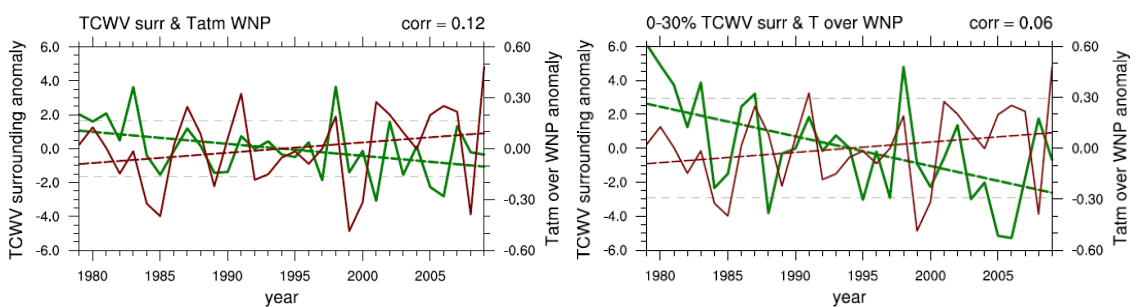


圖 5-5：颱風外圍水氣和大氣溫度之年際變化和趨勢。綠線為颱風外圍水氣(灰線為 1 個標準差)，紅線為西北太平洋大氣溫度。右上角為兩者相關係數，標題粗體加底線者代表時間趨勢通過 90% 統計檢定。由上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。

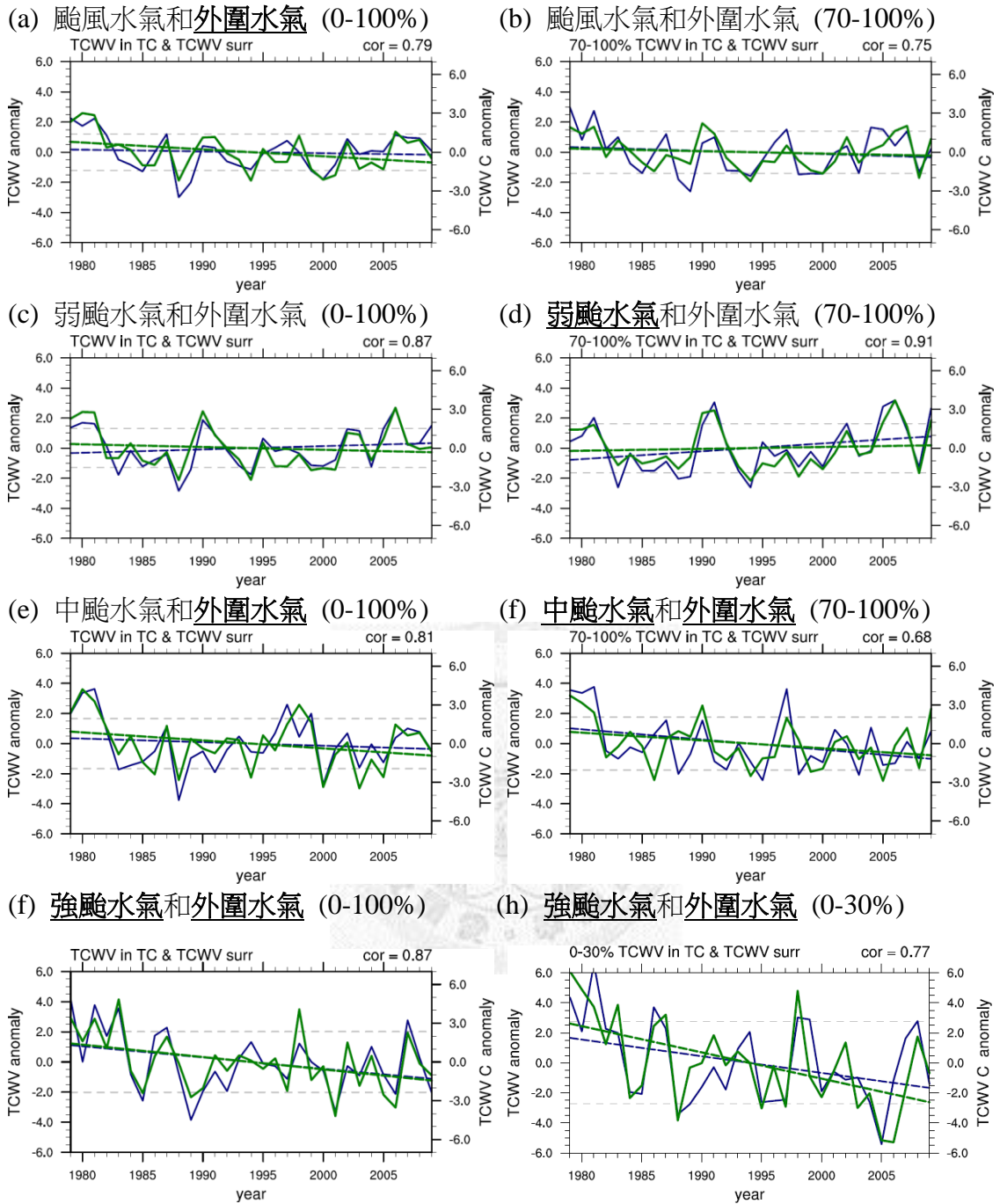


圖 5-6：颱風水氣和颱風外圍水氣之年際變化和趨勢。藍線為颱風水氣(灰線為 1 個標準差)，綠線為颱風外圍水氣。右上角為兩者相關係數，標題粗體加底線者代表時間趨勢通過 90% 統計檢定。由上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。

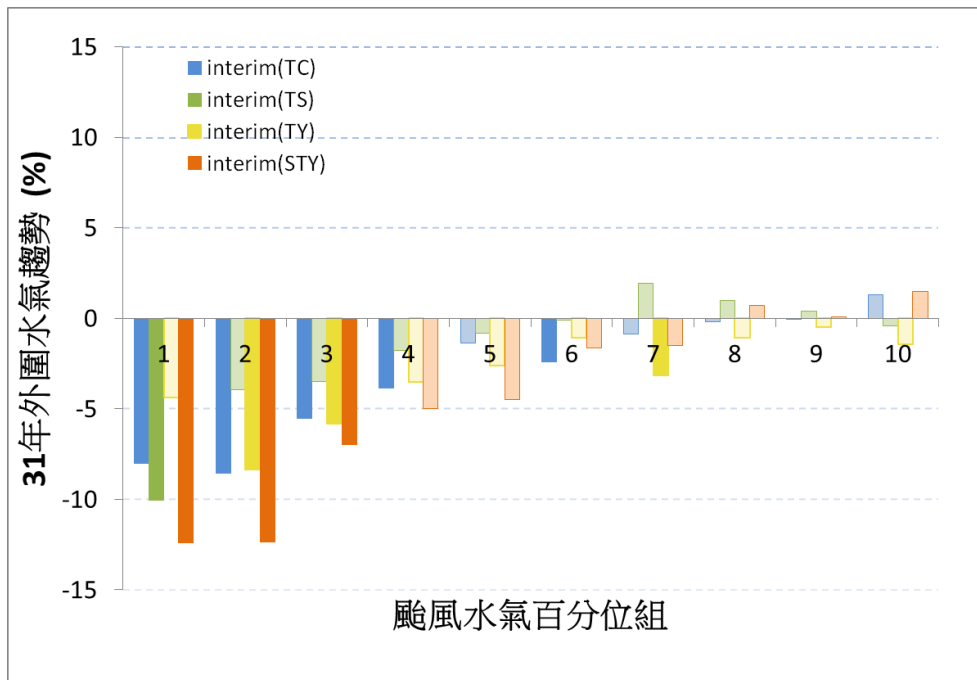
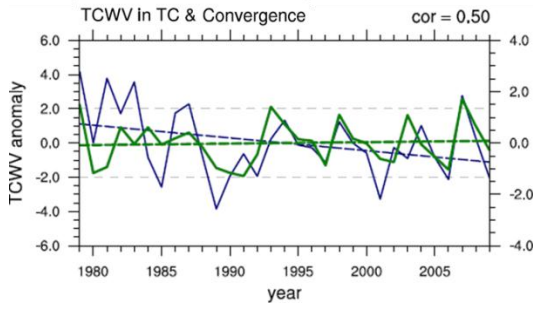
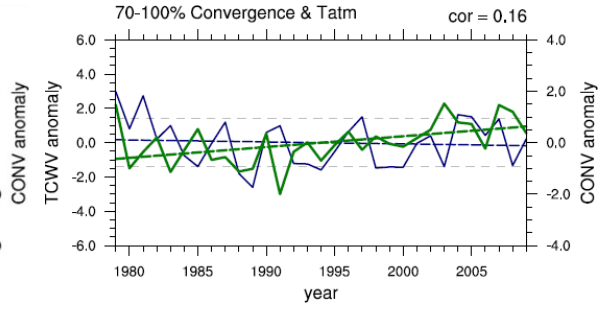


圖 5-7：颱風外圍水氣趨勢。縱軸為水氣趨勢放大至百年的改變量，橫軸為颱風水氣百分位組（由小至大每組 10%）。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過 90% 信心水準統計檢定。

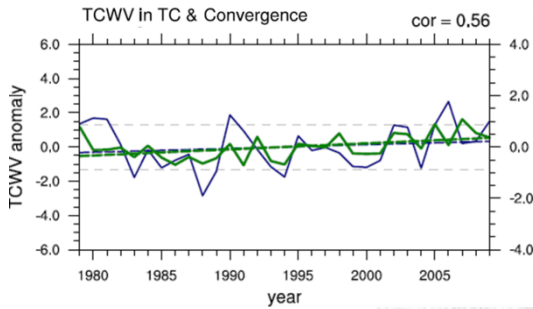
(a) 颱風水氣和**低層輻合** (0-100%)



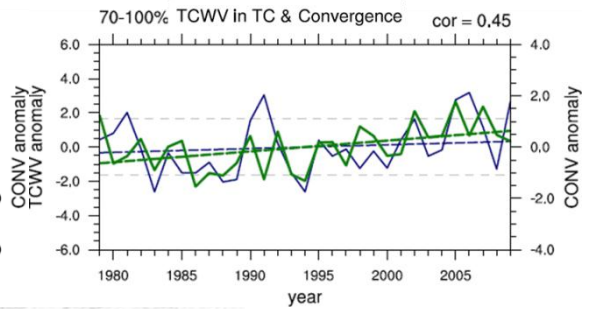
(b) 颱風水氣和**低層輻合** (70-100%)



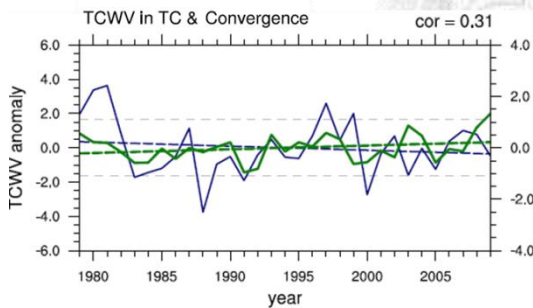
(c) 弱颱風水氣和**低層輻合** (0-100%)



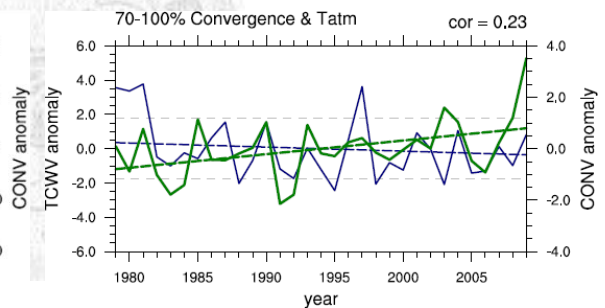
(d) 弱颱風水氣和**低層輻合** (70-100%)



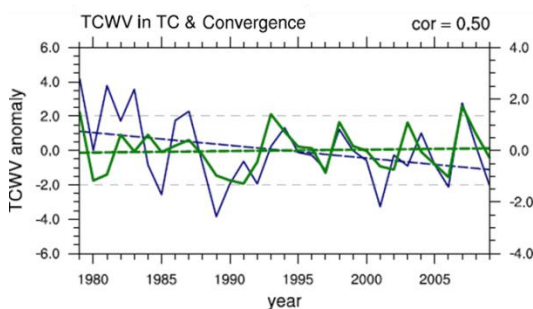
(e) 中颱風水氣和**低層輻合** (0-100%)



(f) 中颱風水氣和**低層輻合** (70-100%)



(g) 強颱風水氣和**低層輻合** (0-100%)



(h) 強颱風水氣和**低層輻合** (0-30%)

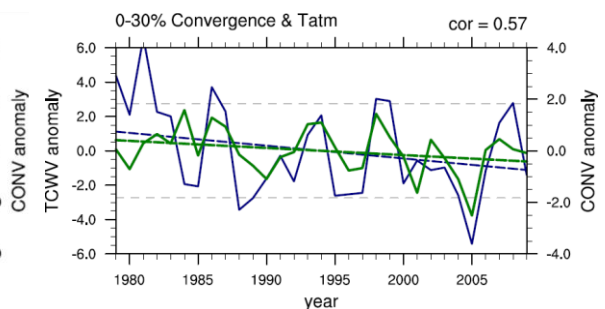


圖 5-8：颱風水氣和颱風低層輻合之年際變化和趨勢。藍線為颱風水氣(灰線為 1 個標準差)，綠線為颱風 850hPa 輻合。右上角為兩者相關係數，標題粗體加底線者代表時間趨勢通過 90%統計檢定。由上而下分別為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風。

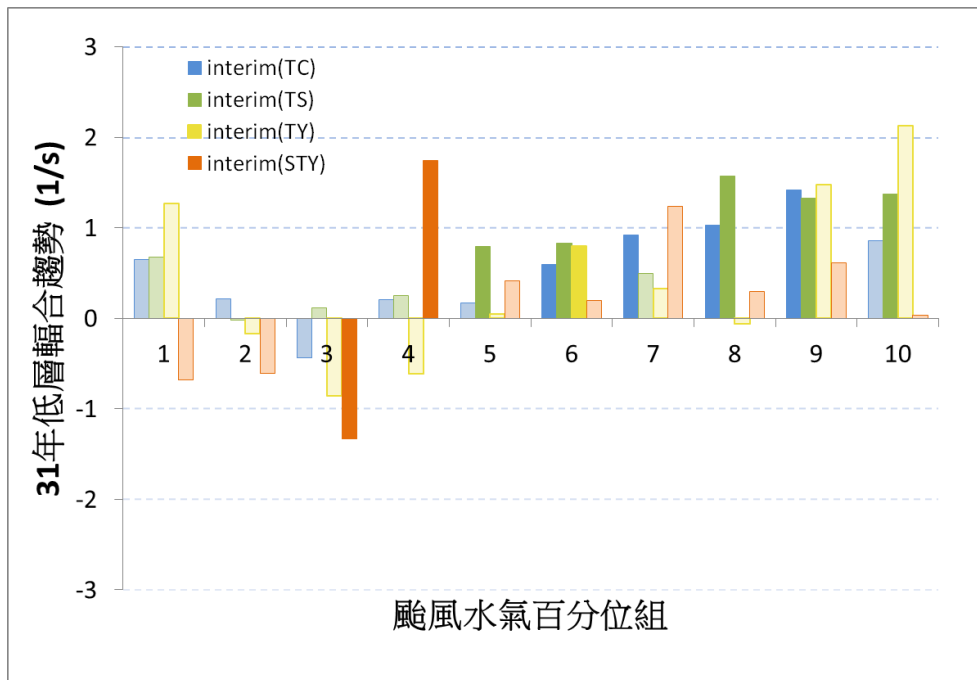
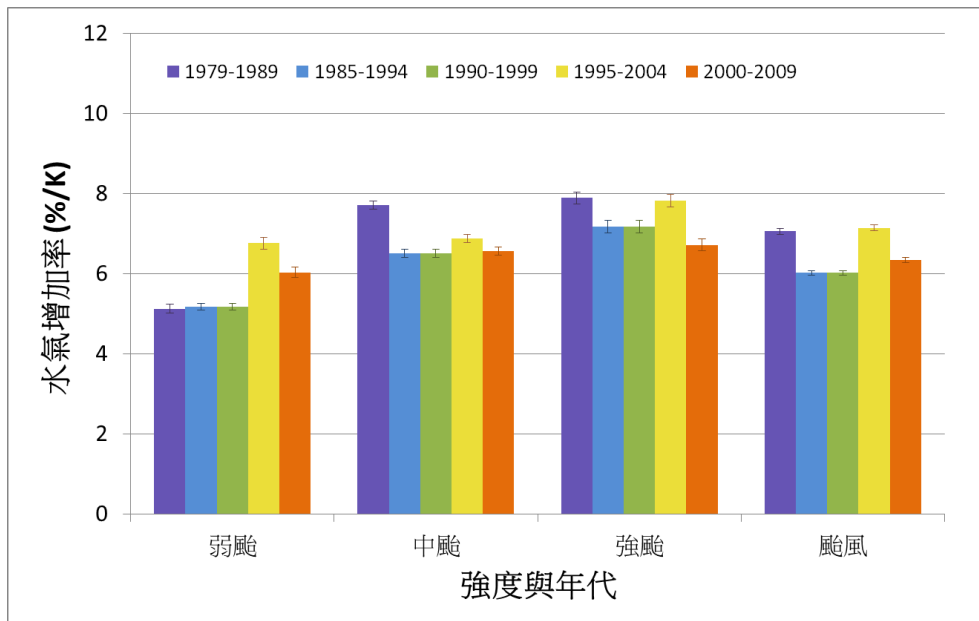


圖 5-9：颱風低層輻合趨勢。縱軸為輻合趨勢放大至百年的改變量，橫軸為颱風水氣百分位組（由小至大每組 10%）。四種顏色為強度分類表示，依序為颱風(所有強度)、弱颱風、中颱風、強颱風，淺色代表未通過 90% 信心水準統計檢定。

(a) 颱風水氣和日尺度外圍溫度



(b) 颱風水氣和西北太平洋月尺度溫度

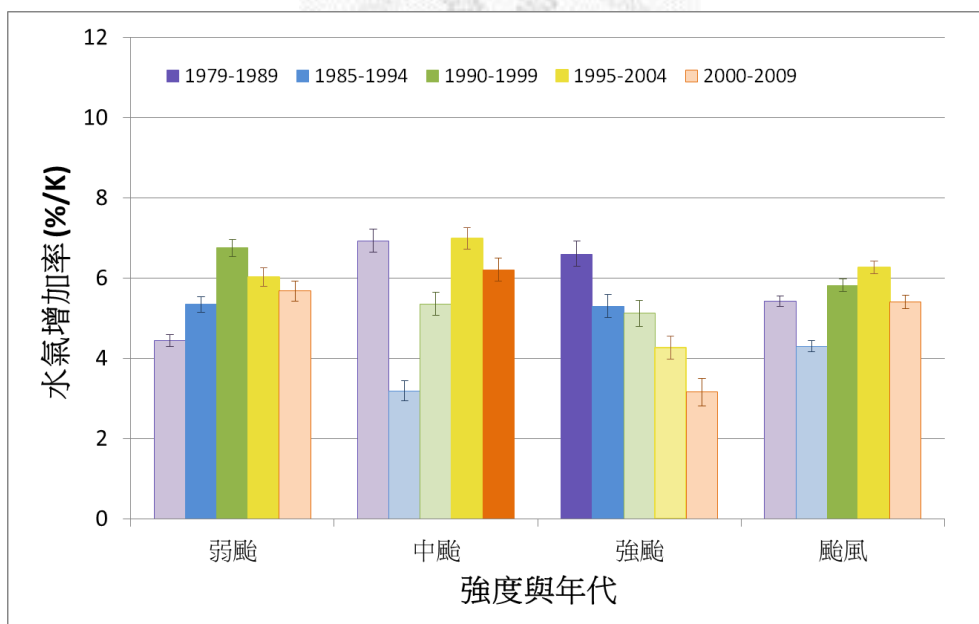
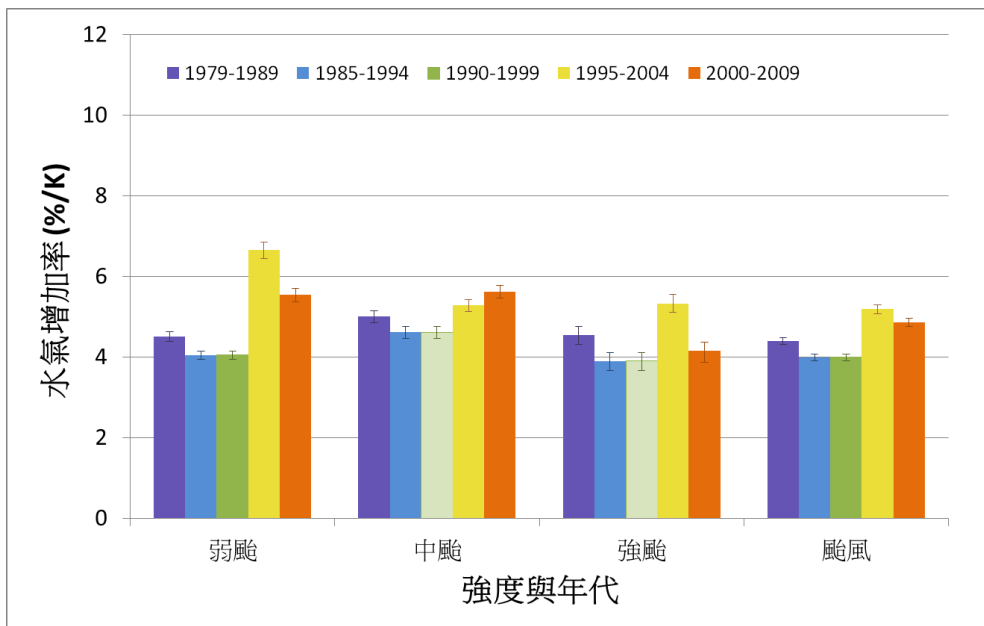


圖 5-10：颱風水氣和大氣溫度的迴歸分析年代際變化。縱軸是水氣增加率，橫軸是強度，其中強颱風包含所有強度，而五種顏色代表五個年代(有重疊)，而淺色代表未通過 95% 信心水準統計檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。(a) 日尺度颱風外圍大氣溫度，(b) 月尺度西北太平洋大氣溫度。

(a) 颱風外圍水氣和日尺度外圍溫度



(b) 颱風外圍水氣和西北太平洋月尺度溫度

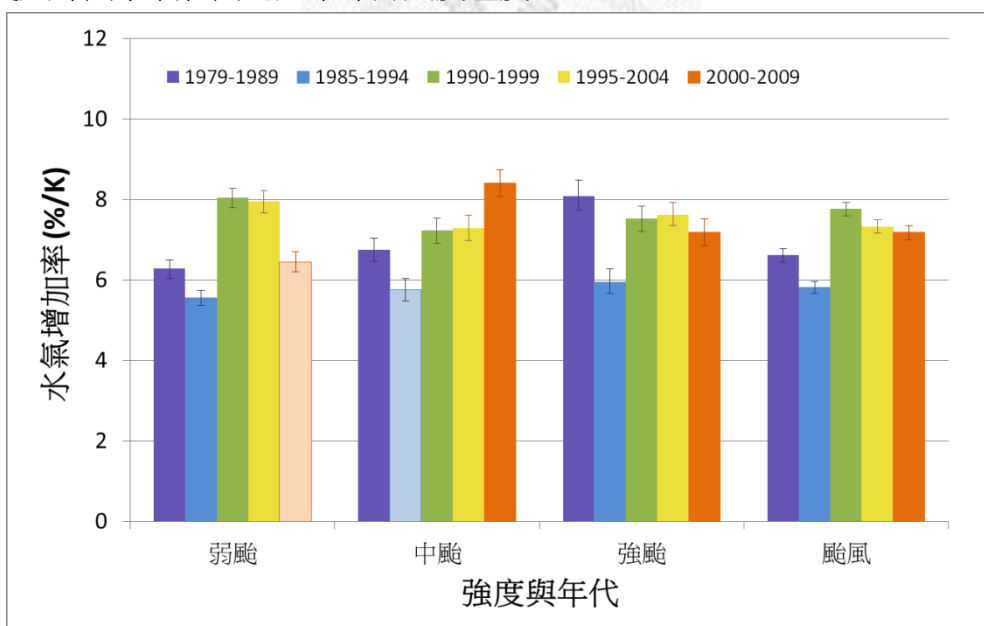


圖 5-11：颱風外圍水氣和大氣溫度的迴歸分析年代際變化。縱軸是水氣增加率，橫軸是強度，其中強颱包含所有強度，而五種顏色代表五個年代(有重疊)，而淺色代表未通過 95% 信心水準統計檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。(a) 日尺度颱風外圍大氣溫度，(b) 月尺度西北太平洋大氣溫度。

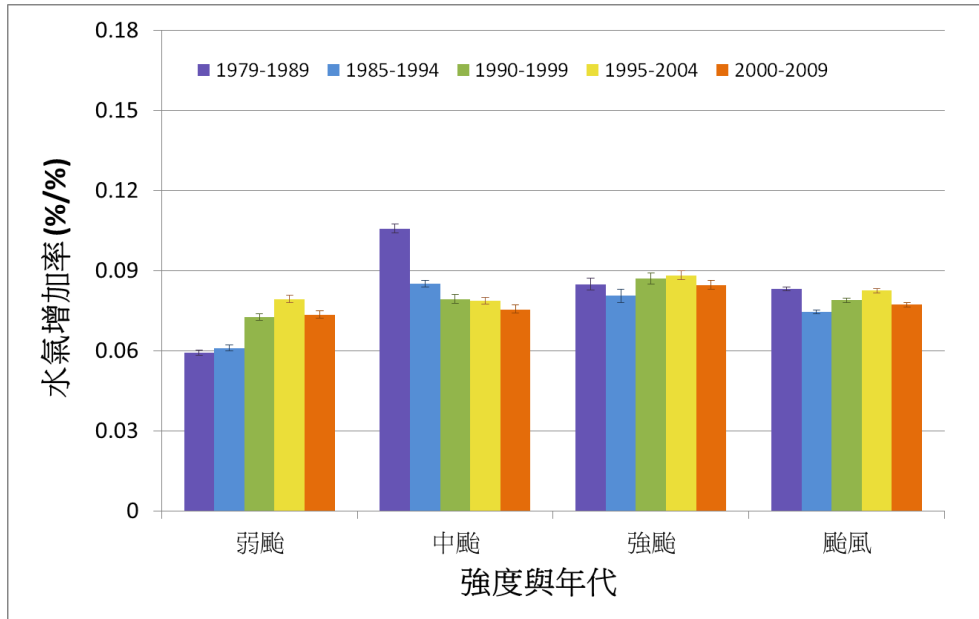
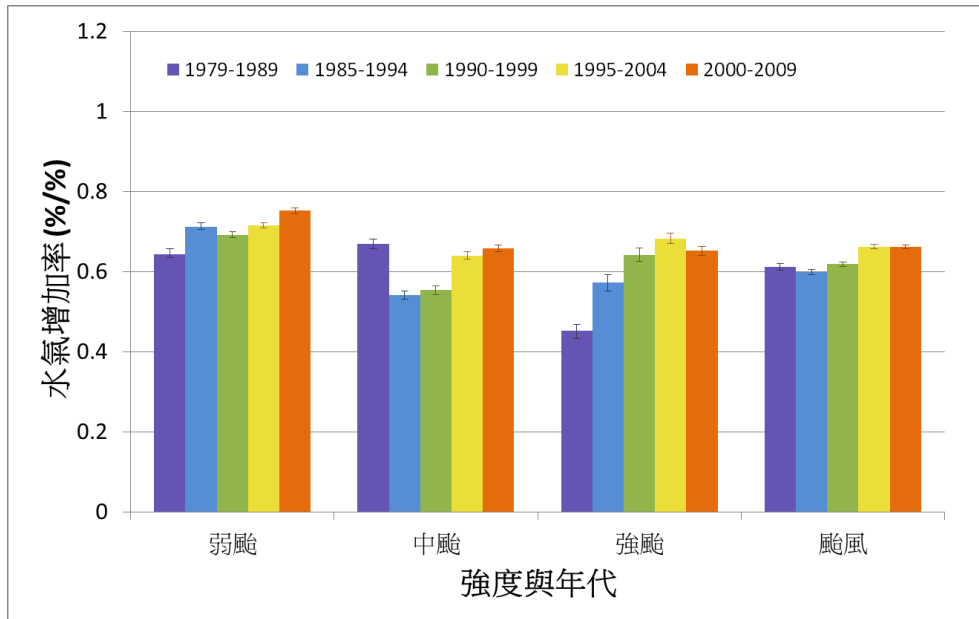


圖 5-12：颱風水氣和颱風水氣輻合的迴歸分析年代際變化。縱軸是水氣增加率，橫軸是強度，其中強颱風包含所有強度，而五種顏色代表五個年代(有重疊)，而淺色代表未通過 95% 信心水準統計檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。



(a) 颱風水氣和外圍水氣



(b) 颱風水氣和低層輻合

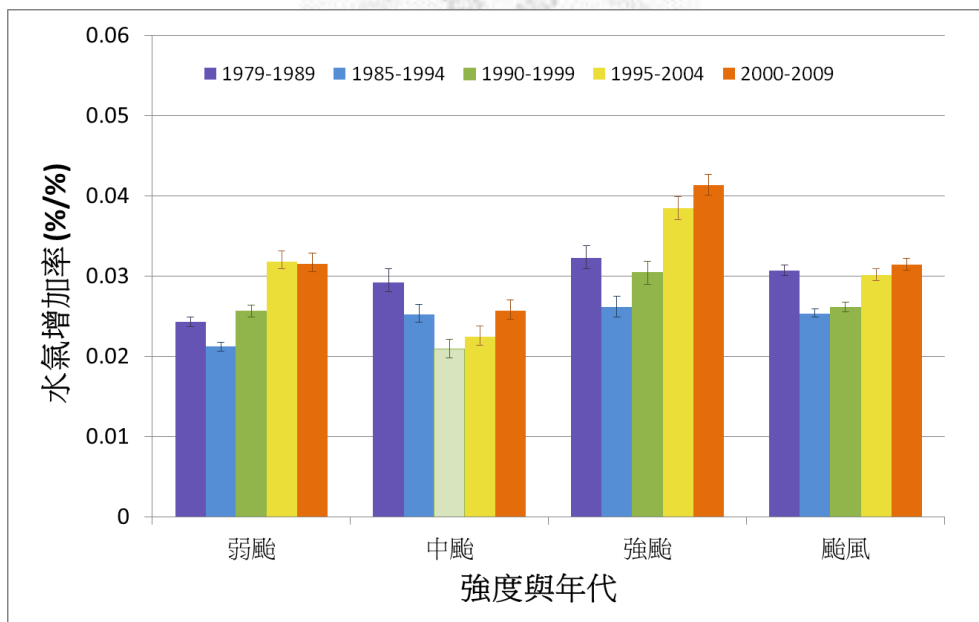
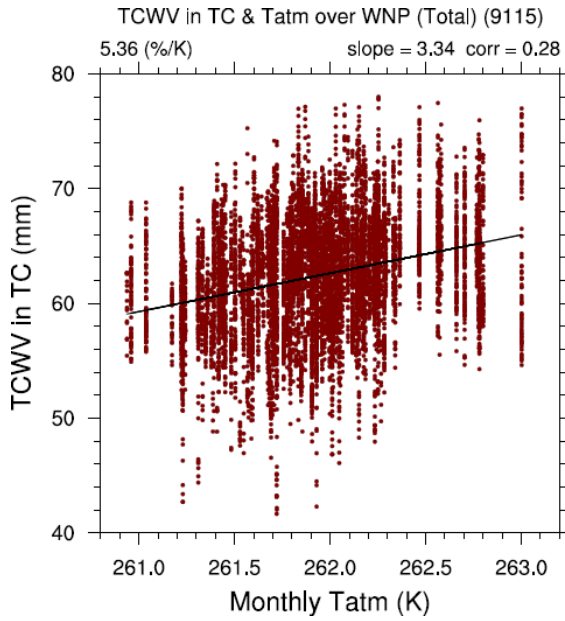
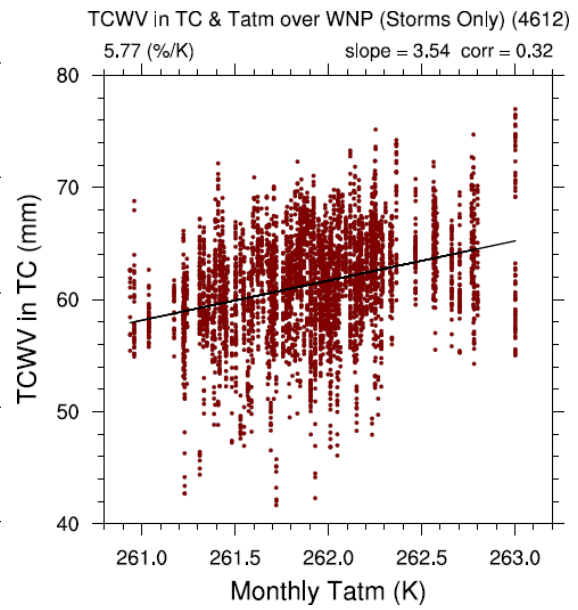


圖 5-13：(a) 颱風水氣和外圍水氣的迴歸分析年代際變化，(b) 颱風水氣和低層輻合的迴歸分析年代際變化。縱軸是水氣增加率，橫軸是強度，其中強颱風包含所有強度，而五種顏色代表五個年代(有重疊)，而淺色代表未通過 95% 信心水準統計檢定，柱頂直線代表 2 個標準差。

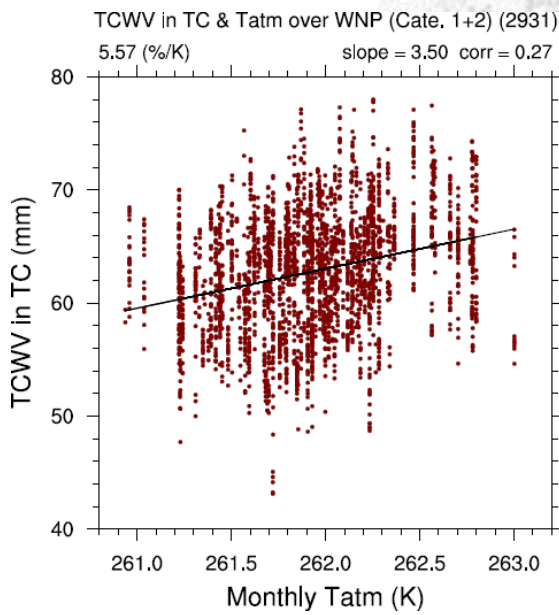
(a) 所有颱風



(b) 弱颱



(c) 中颱



(d) 強颱

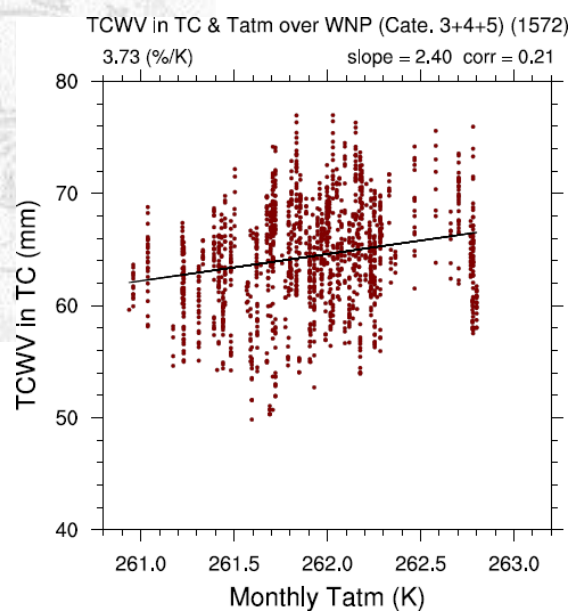


圖 6-1：颱風水氣與月尺度西北太平洋大氣溫度的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度的個案)，(b) 弱颱等級，(c) 中颱等級，(d) 強颱等級。

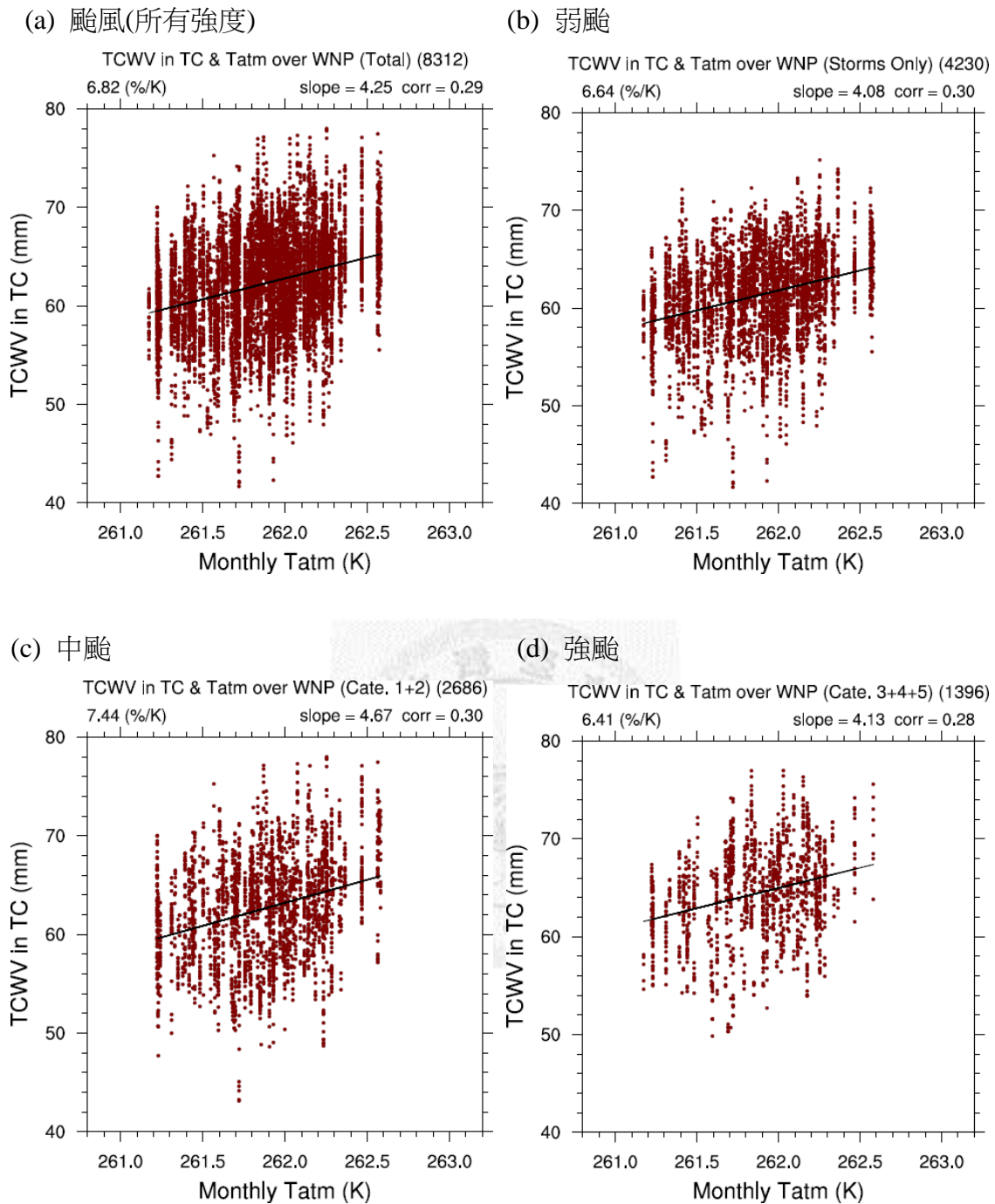
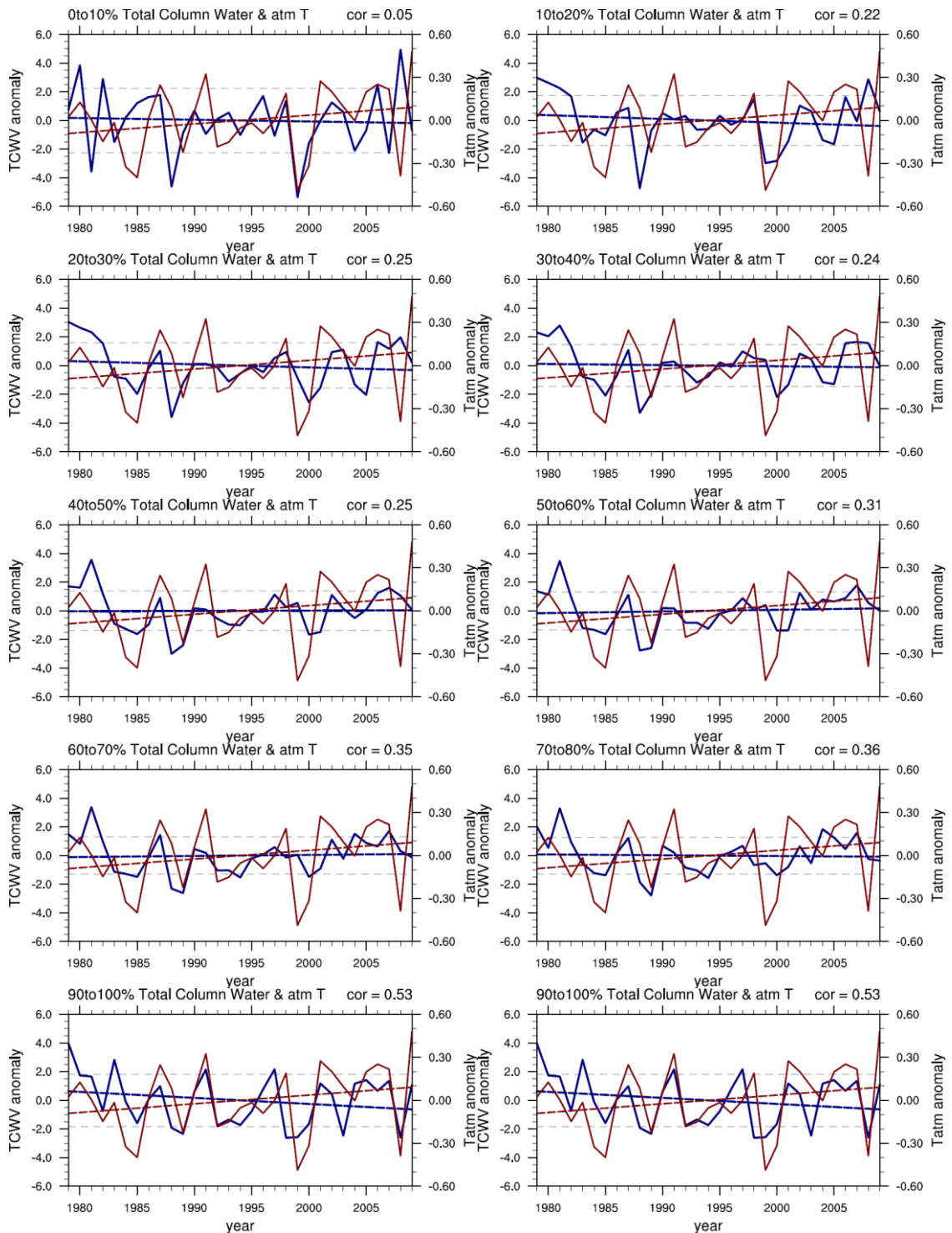
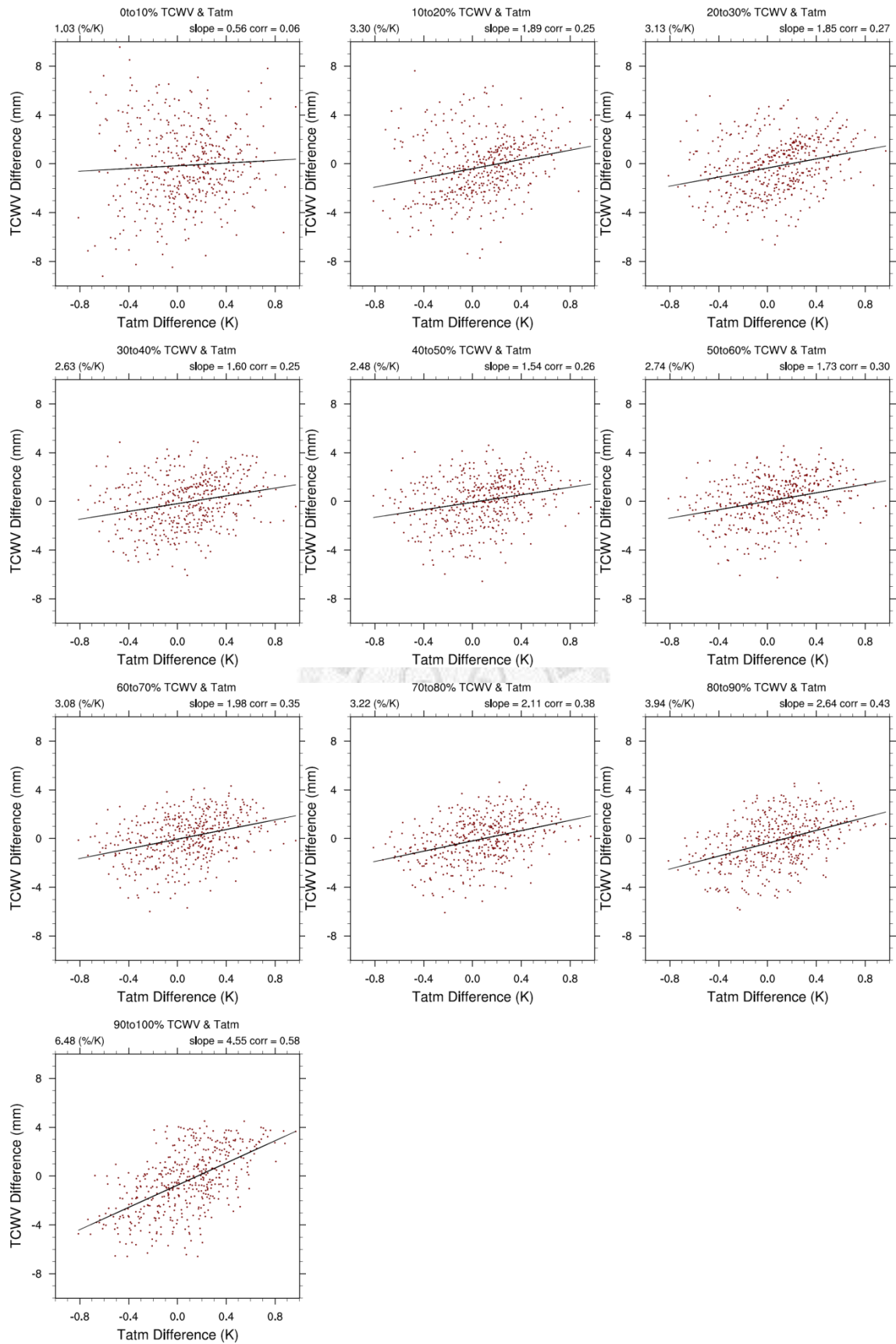


圖 6-2：去掉極端溫度(兩個標準差)資料後，颱風水氣與月尺度西北太平洋大氣溫度的迴歸分析，(a) 所有颱風(所有強度)的個案，(b) 弱颱風等級，(c) 中颱風等級，(d) 強颱風等級。

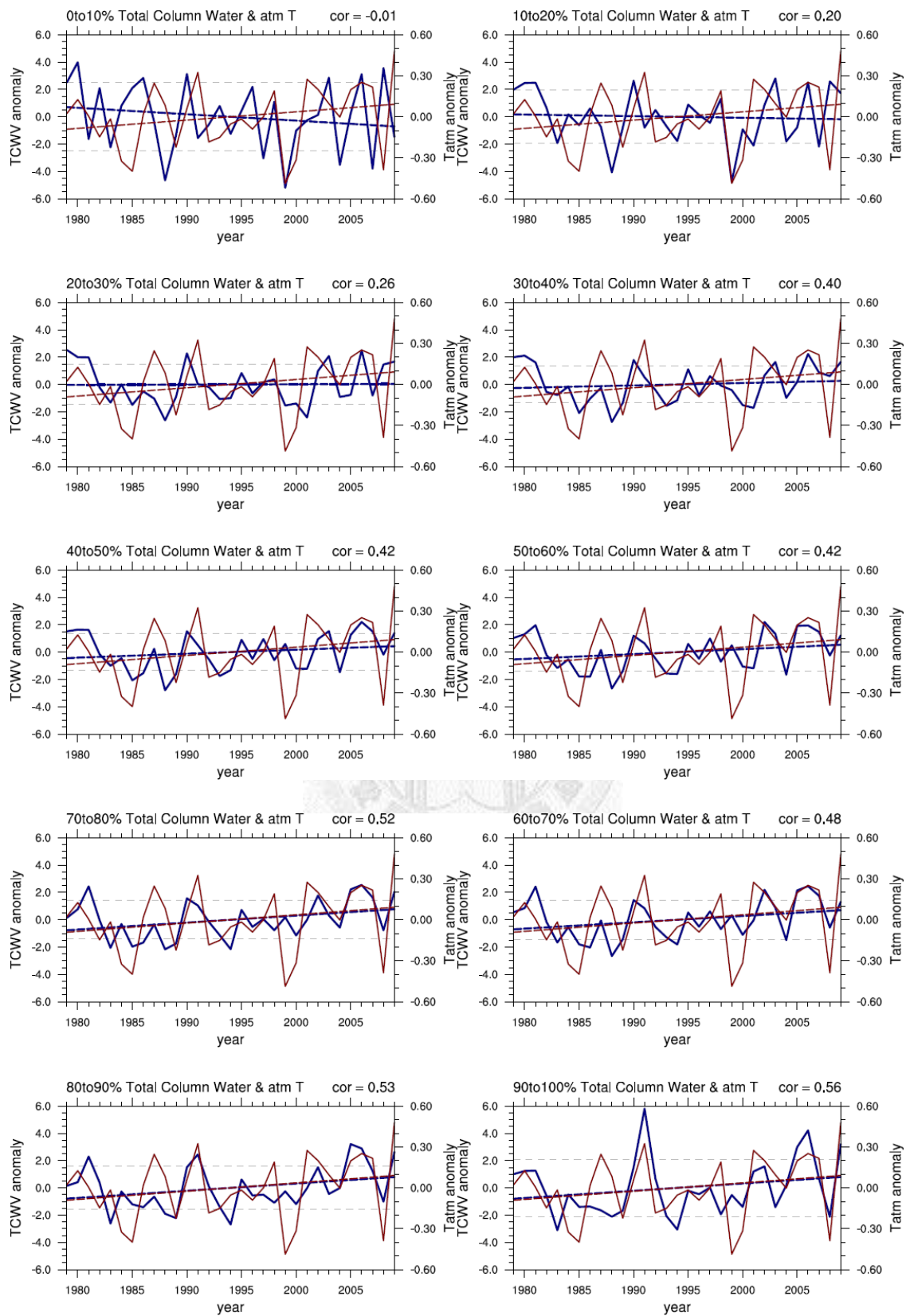
附錄



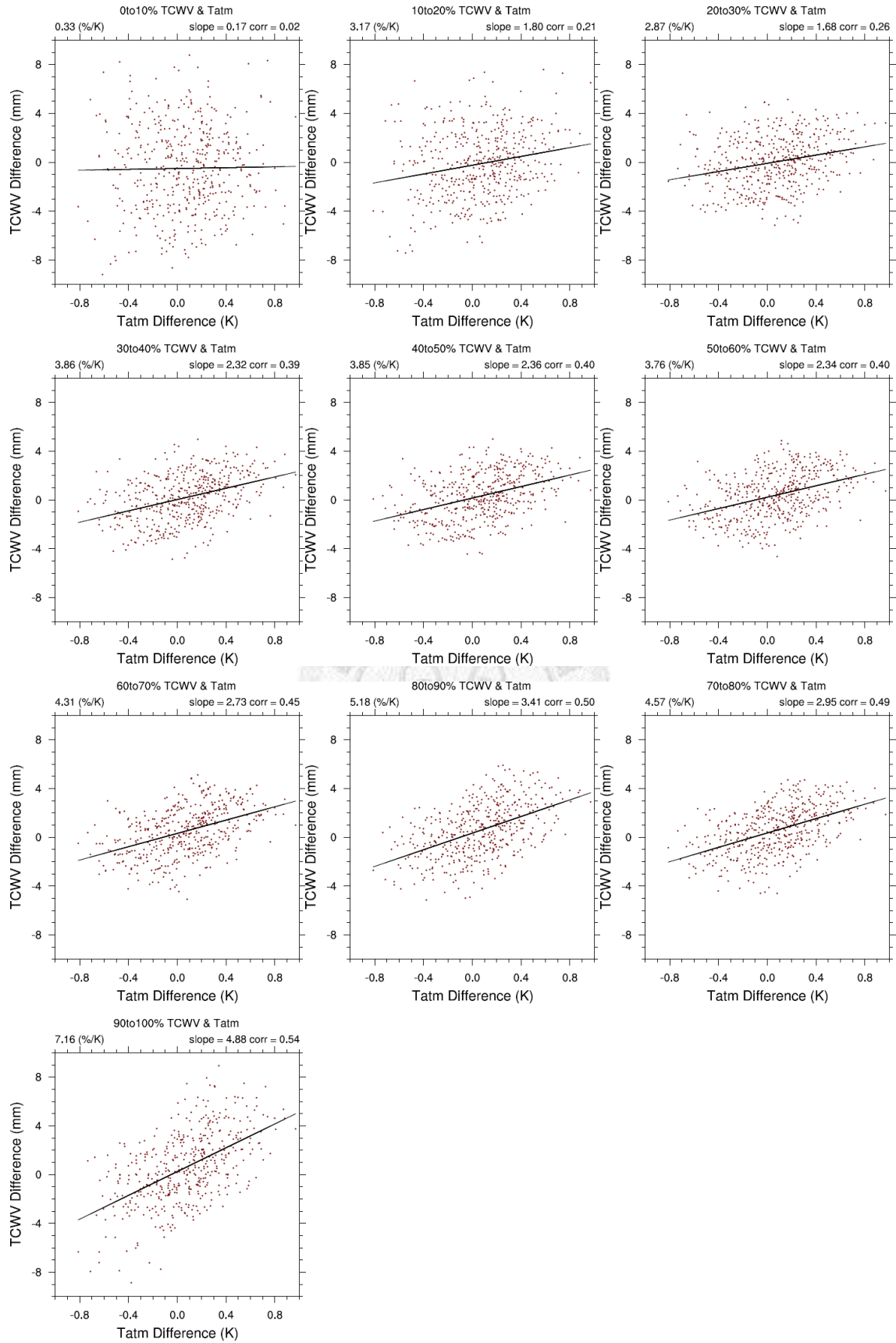
附 3-1：EC-interim 年際變化圖，依颱風水氣每 10% 由小至大排列，藍線為颱風水氣(灰線為一個標準差)，紅線是西北太平洋大氣溫度，右上方為相關值。



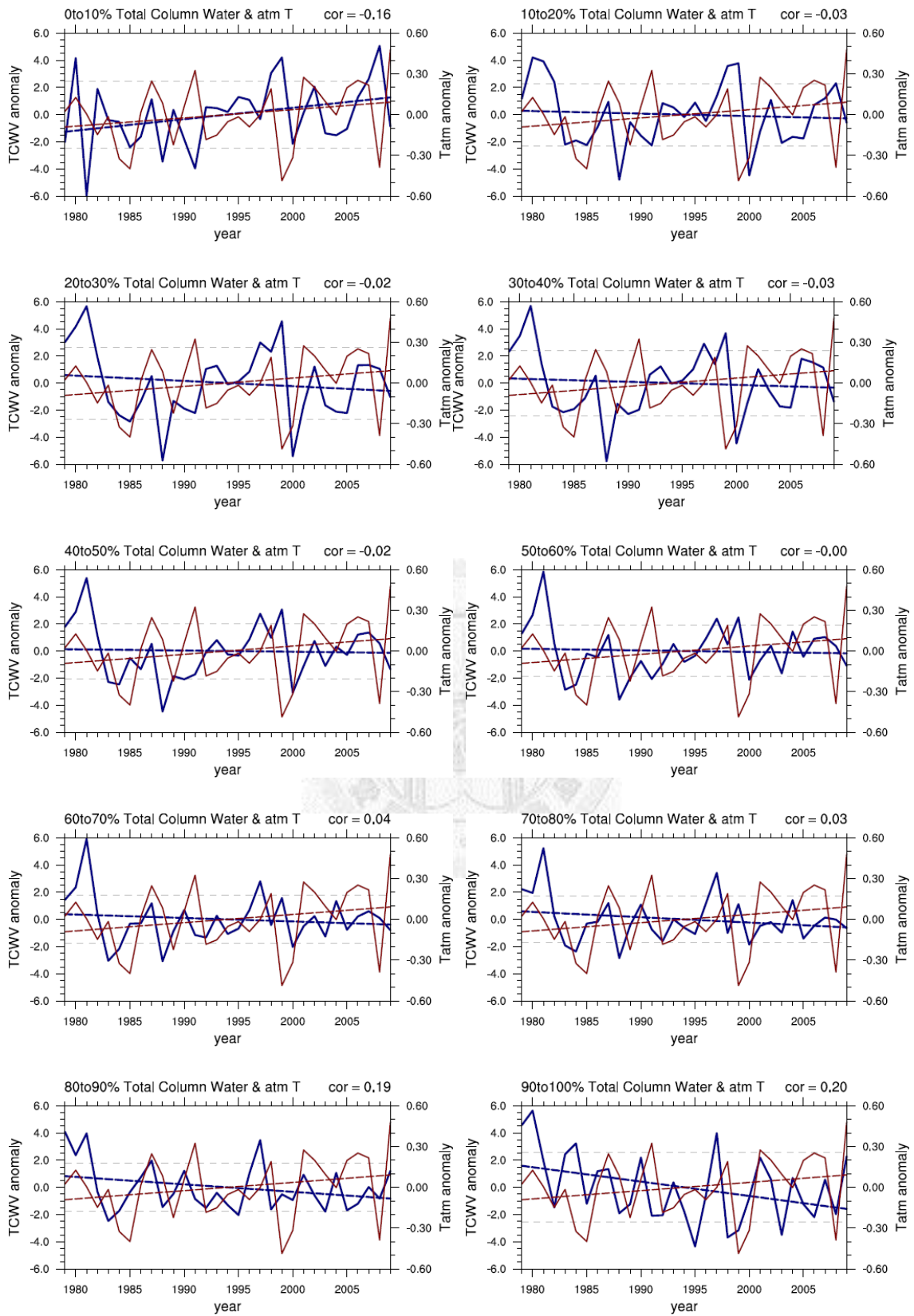
附 3-2: EC-interim 颱風水氣和西北太平洋溫度之迴歸分析, 依颱風水氣每 10% 由小至大排列, 標題下依序為水氣增加率、迴歸直線斜率、相關係數。



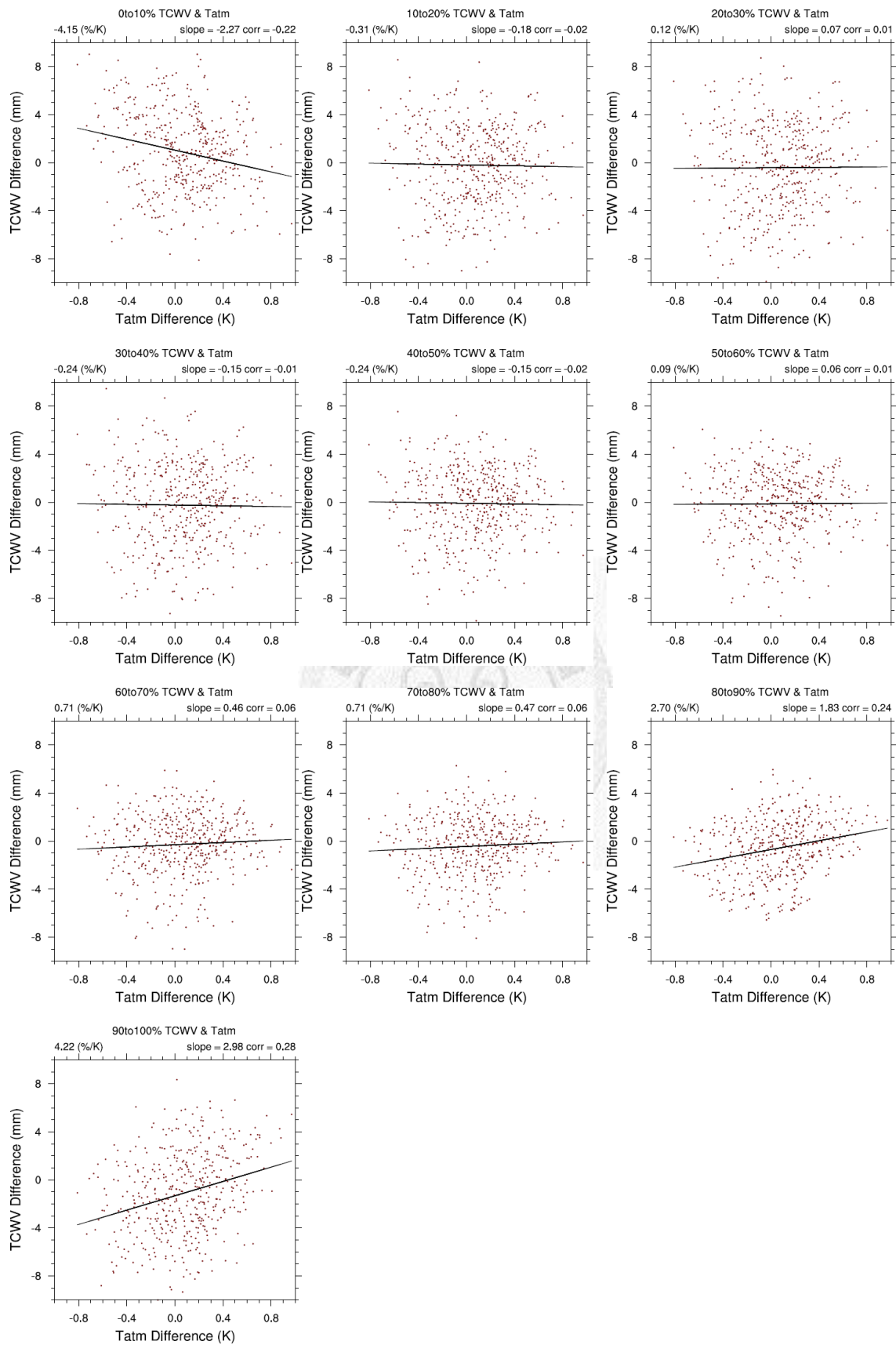
附 3-3：EC-interim 年際變化圖，依弱颱風水氣每 10% 由小至大排列，藍線為弱颱風水氣(灰線為一個標準差)，紅線是西北太平洋大氣溫度，右上方為相關係數。



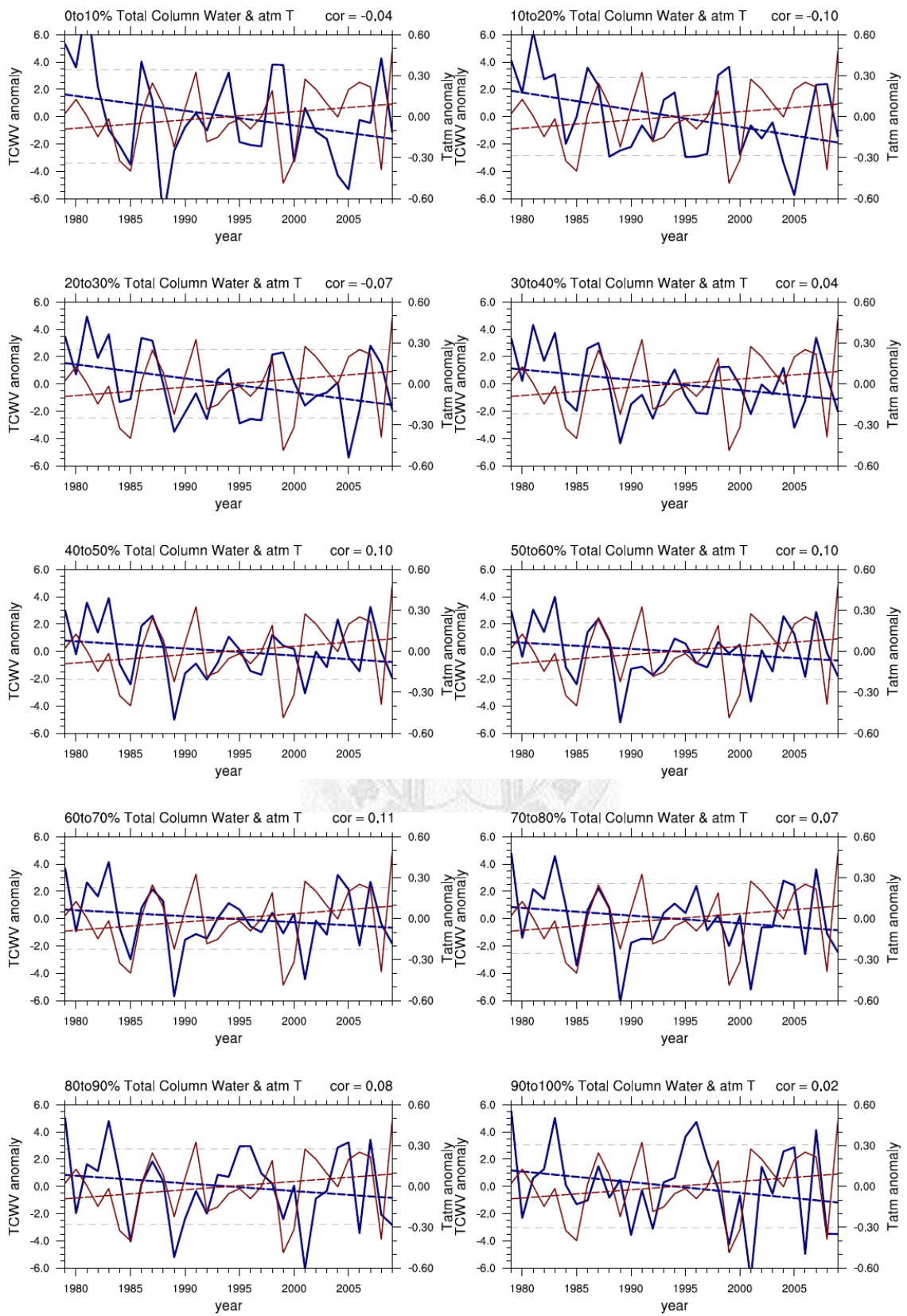
附 3-4: EC-interim 弱颱風水氣和西北太平洋溫度之迴歸分析, 依弱颱風水氣每 10% 由小至大排列, 標題下依序為水氣增加率、迴歸直線斜率、相關係數。



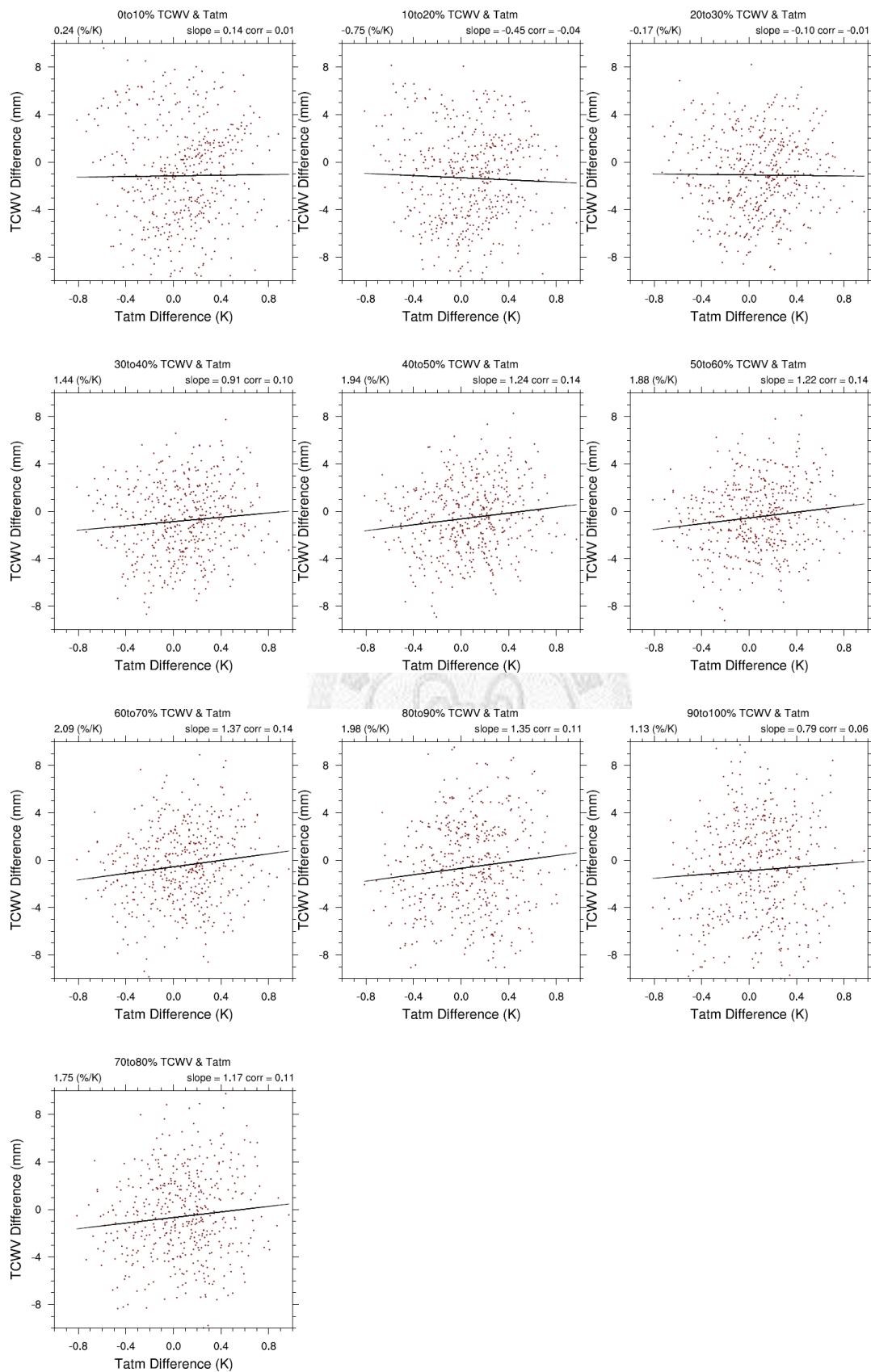
附 3-5：EC-interim 年際變化圖，依中颱水氣每 10% 由小至大排列，藍線為中颱水氣(灰線為一個標準差)，紅線是西北太平洋大氣溫度，右上方為相關係數。



附 3-6：EC-interim 中颱風水氣和西北太平洋溫度之迴歸分析，依中颱風水氣每 10% 由小至大排列，標題下依序為水氣增加率、迴歸直線斜率、相關係數。



附 3-7：EC-interim 年際變化圖，依強颱風水氣每 10% 由小至大排列，藍線為強颱風水氣(灰線為一個標準差)，紅線是西北太平洋大氣溫度，右上方為相關係數。



附 3-8：EC-interim 強颱水氣和西北太平洋溫度之迴歸分析，依強颱水氣每 10% 由小至大排列，標題下依序為水氣增加率、迴歸直線斜率、相關係數。