

# 氣候變遷下台灣颱風豪雨之變化與機制探討

蘇世穎<sup>1</sup> 陳郁涵<sup>2</sup> 楊憶婷<sup>3</sup> 徐理寰<sup>4</sup> 郭鴻基<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中國文化大學大氣科學系

<sup>2</sup> 國立臺灣大學大氣科學系

<sup>3</sup> 國立科學工藝博物館科技教育組

<sup>4</sup> 國家實驗研究院臺灣颱風洪水研究中心

(中華民國一〇六年十一月九日收稿；中華民國一〇七年三月十二日定稿)

## 摘 要

本研究利用中央氣象局 21 個長期雨量測站，分析 1960-2015 年 (56 年間) 共 91 個西行且穿過台灣陸地之颱風，回顧並整理台灣颱風豪雨事件之研究成果。在記錄中累積降雨量前 15 名颱風中有 10 個發生 2004 年之後，且在颱風接近台灣的過程中，無論在登陸前、登陸期或是離陸後的階段，近 30 年的颱風平均累積降雨量與平均降雨強度與遠 30 年相比都有增加的趨勢。其中登陸前與登陸期的降雨平均強度增加 15%，但離陸後平均降雨強度更是顯著增加 34%。登陸前顯著降雨的颱風其打轉之路徑會增加颱風影響延時，導致颱風極端降雨量較多。登陸期降雨受颱風環流與地形交互作用影響，慢速且登陸位置偏北之颱風，透過被地形鎖定的對流導致的不對稱非絕熱位渦趨勢，將會使颱風移速減慢並使延時增加，導致更多颱風極端降雨，與颱風本身強度之相關性較低。颱風離陸後之降雨強度會正比於西南季風提供之水氣通量，而颱風極端降雨量則受到水氣通量與延時影響，以偏中間之颱風路徑(Type-C)的相關性最顯著，而近 30 年路徑 C 的颱風數量增加，也反應在颱風離陸後極端降雨的增加。分析顯示颱風極端降雨事件的頻率與累積極端降雨量除了上升趨勢外，亦具有顯著的週期性變化訊號。兩者除了有很大之年際變化外，並同時具有明顯的年代際變化訊號。另一方面，全球暖化之熱力機制所導致的極端降雨氣候變遷訊號，則受地形效應的影響而被掩蓋。長期氣象測站的空間分佈對於颱風極端降雨事件分析的影響，會低估山區的極端降雨，但長期大範圍的降雨分佈特徵具有一致性。換言之，只要能維持測站空間分布的均勻性，則不會影響極端降雨之變化趨勢與週期振盪特徵，而資料記錄時間的長度應是優先考量之因素。

關鍵字：颱風極端降雨、颱風運動特性、年代際變化、西南氣流、資料空間分布

## 一、前言

颱風是極具破壞性的自然災害之一，既影響台灣民生經濟，同時提供近 30% 的年降雨量，是重要的水資源之一。近年來許多颱風為台灣造成非常大的災害，如 2015 年的蘇迪勒及杜鵑颱風暴雨導致河岸的土石沖刷，嚴重影響大台北地區的水資源調度，也引起社會大眾及政府單位對於氣候變遷與颱風災害的重視。自 1960 年以來，根據台灣有長期紀錄之雨量資料統計顯示，為台灣地區帶來最大總雨量的前 15 名颱風便有 10 個出現在 2004 年以後（表 1），顯示近十年的颱風降雨有顯著增加的趨勢，這樣的訊號也在許多的研究中顯示出相同的結果(Chang et al. 2013; Tu and Chou 2013; Liu et al. 2009)。其中具有最大累積雨

量的是 2009 年莫拉克颱風，強降雨及其伴隨之複合性災害甚至造成小林村滅村(Ge et al. 2010; Lee et al. 2011; Chien and Kuo 2011)。而近十年的颱風強降雨是否與全球暖化有關，目前仍是受到各方熱烈討論的話題。

根據政府間氣候變遷專門委員會(IPCC)在氣候變遷第五次評估報告(AR5)中所述，在未來氣候變遷的趨勢之下，大部分地區的乾、濕季降雨的對比將比現在更為強烈。換句話說，在目前所推估之氣候變遷的情境下，我們可能會面對次數更為頻繁與強度更強的極端降雨事件，而這種現象將對於人類的生活與經濟發展產生重大的影響。相較於前一次的氣候變遷第四次評估報告(AR4)，第五次報告中特別提醒要增加對於氣候之年代際變化(multi-decadal variation)的關注，因

表 1 過去 56 年侵台颱風累積降雨量前 15 名之颱風個案總累積降雨量、及颱風路徑分類（依登陸位置）。

年份	颱風名稱	總累積降雨（毫米）	氣象局路徑分類（登陸位置）	備註
<b>2009</b>	<b>Morakot</b>	<b>8996</b>	<b>西行第 3 類（中）</b>	
2001	Nari	8108	特殊路徑	
<b>2008</b>	<b>Sinlaku</b>	<b>8105</b>	<b>西行第 2 類（北）</b>	<b>Looping track</b>
<b>2005</b>	<b>Haitang</b>	<b>5589</b>	<b>西行第 3 類（中）</b>	<b>Looping track</b>
1996	Herb	4836	西行第 2 類（北）	
<b>2012</b>	<b>Saola</b>	<b>4677</b>	<b>西行第 2 類（北）</b>	<b>Looping track</b>
1989	Sarah	4655	西行第 3 類（中）	<b>Looping track</b>
1960	Shirley	4637	西行第 2 類（北）	
<b>2015</b>	<b>Soudelor</b>	<b>4115</b>	<b>西行第 3 類（中）</b>	
<b>2007</b>	<b>Krosa</b>	<b>3936</b>	<b>西行第 2 類（北）</b>	<b>Looping track</b>
<b>2004</b>	<b>Mindulle</b>	<b>3856</b>	<b>北行第 6 類</b>	
<b>2008</b>	<b>Jangmi</b>	<b>3800</b>	<b>西行第 2 類（北）</b>	
<b>2008</b>	<b>Kalmaegi</b>	<b>3763</b>	<b>西行第 2 類（北）</b>	
<b>2005</b>	<b>Talim</b>	<b>3526</b>	<b>西行第 3 類（中）</b>	
1992	Polly	3451	西行第 3 類（中）	<b>Looping track</b>

為這些年代際變化有很強的地區性差異，對於近未來的短期氣候推估也會有很大的影響。所以研究與了解台灣地區極端降雨事件的年代際變化，不單有助於我們對於氣候變遷下極端事件的認知，更進一步能增加對於短期氣候預報的能力。

一些早期的研究中(Hsu and Chen 2002, Lu and May 2003)，利用了中央氣象局 5 個長期測站（台北、台中、台南、恆春與花蓮）的資料顯示在 1920~1995 的 76 年間，台灣地區的總降雨量沒有明顯的趨勢。Lu et al. (2007)利用了測站的時雨量資料，以測站降雨強度前百分之十的個案作為極端降雨(extreme rainfall, ER)事件，進一步分析 1951~2005 年之間測站極端降雨頻率的長期變化。在他們的研究中顯示了台北與花蓮測站的極端降雨頻率有顯著的增加，但是台中、台南與恆春測站在 1979 年之後則沒有明顯的趨勢。在此同時，相關研究也發現了近期的總降雨頻率有降低的現象(Hsu and Chen 2002, Hung and Kao 2010)，其中小雨的降雨頻率變化更為明顯。Liu et al. (2009)分析了 1961~2005 年台灣 17 個測站的日降雨強度，發現了最強百分之十降雨強度的降雨事件有顯著的增加，而最弱百分之十降雨強度的降雨事件明顯減少，而小雨發生頻率減少的原因，可能與全球暖化現象導致大氣穩定度增加有關(Hartmann et al. 2000)。

對於氣候變化的研究，我們經常以週期性變化(periodical)與非週期性變化(non-periodical)來區分在不同時間尺度下的氣候變化訊號。換句話說，如果我們所關心的氣候變化現象是很短週期的變化，如 2~4 年週期的聖嬰現象，那週期超過 10 年以上的氣候變化，就可以被視為一非週期性變化。這代表了如果關心議題是未來 10~30 年的氣候變化，那年代際的氣候變遷訊號將會對我們

的研究有很重要的影響。如同 Hung et al. (2004)的研究中，利用北台灣的測站資料，針對台灣地區春季降雨進行分析，他發現 20 世紀以來，台灣的春季降雨受到太平洋年代際震盪(Pacific Decadal Oscillation, PDO)的影響。他們的研究顯示，在 PDO 呈現正相位時，會增強西南氣流進而導致春雨增加；相反的，當 PDO 呈現負相位時，則伴隨著較強的東北季風阻斷了水氣的供給，進而產生較少的降雨，這也顯示大尺度之低頻震盪現象亦會造成降雨的變化。

更宏觀的去觀降雨強度與頻率的變化，可以發現極端降雨事件發生改變並非台灣的局地現象。Fujibe et al. (2006)利用日本 51 個地面測站的日降雨強度資料，分析 1901~2004 年間極端降雨降雨頻率的變化。他們發現最強百分之十的極端降雨事件頻率，以每年 0.23% 的速度增加，而此一現象在西日本地區的秋季特別明顯。而在美國地區，過去 100 年的平均降雨量增加了 7% (Karl et al. 2009)，極端降雨量（最強百分之一）在過去一個世紀中增加了 20%。在 1958-2007 期間，美國東北地區的極端降雨量增加了 67%，而中西部地區則增加了 31%，這也顯示了在不同氣候區降雨量的變化趨勢會有所不同(Karl and Knight 1998; Fujibe et al. 2005, Goswami et al. 2006, Lau and Wu 2007, Piao et al. 2010)。

近期針對臺灣颱風極端降雨的研究，顯示颱風豪雨事件有年代際變化的訊號存在(Su et al. 2012, Chang et al. 2013)。再進一步的分析中，颱風極端降雨的年代際變化與颱風移行的特性（路徑、移速與打轉等）變化有明顯的相關性(Su et al. 2012, Chang et al. 2013, Tu and Chou 2013)，而這與氣候變遷所造成之大尺度環境場變化趨勢一致。本文將利用中央氣象局 21 個長期雨量測站，

回顧並整理過去一段時間針對颱風豪雨事件的研究成果，同時利用 1960~2015 年（56 年間）共 91 個穿過台灣陸地之颱風降雨作為範例，探討其降雨之年際與年代際變化，和影響其變化之可能機制，最後亦將討論長期氣象資料的時空特性對於氣候變遷下極端天氣事件研究之影響。

## 二、資料和方法

本研究所使用之資料包含 1960~2015 年共 91 個颱風個案，分析颱風影響期間台灣的降雨強度。測站在空間上均勻分佈在南北台灣，且包含 5 個山區測站。考量到極端降雨氣候變化之特性，故所選取之測站皆為品質較穩定，且具有長時間逐時降雨記錄之測站。在先前的研究中顯示，這樣的資料特性可能會因為早期缺乏高空間解析度之山區測站資料，而低估極端降雨發生的頻率與強度，但確實可以掌握其極端降雨的空間分布特徵(Su et al. 2012)。在考量到氣候分析所需長時尺度與均勻空間分布之資料，故使用 21 個中央氣象局人工測站資料雨量站（圖 1）進行分析。與先前相關的研究相同，在本研究中我們採用百分位法作為定義極端降雨事件之門閥值(e.g., Peralta-Hernández et al. 2009; Tolika et al. 2007; Haylock et al. 2006; Salinger and Griffiths 2001)。但在先前的研究中我們發現採用不同百分位作為門閥值，會直接影響極端降雨事件的敏感度與穩定性。本研究將採用在氣候變化中較能保持穩定性之 95 百分位的降雨量(9mm/hr)做為極端事件的門閥值，探討極端的降雨事件在不同時期的變化趨勢。

關於颱風路徑資料部分，中央氣象局將影響台灣的颱風路徑分為九類。如圖 1 (b)~(d)所示，在登陸且穿越台灣之颱風個案中有三種主要的颱風路徑，分別是由東向西穿越台灣地形北邊（路

徑 N(2)、共有 37 個個案）、中間（路徑 C(3)、共有 22 個個案）和南邊（路徑 S(4)、共有 14 個個案），另外有 18 個個案分散在其餘路徑型態中。在早期的研究中，大多以警報發布時期作為颱風影響台灣之時間，但警報之發佈會受到很多非客觀因素之影響，故需更為一致性的科學指標作為依據。在本研究中考量颱風運動會受到本身環流、大尺度環境與地形影響等因素，我們利用颱風中心距海岸線 100km 之內的範圍，定義為颱風影響台灣的時間，我們將其分為三階段，沿颱風行徑方向分別為登陸前、登陸期與離陸後(pre-landing, overland, and post-landfall)。登陸前階段指的是登陸前颱風中心與海岸線最短距離在 100 公里以內的時段，登陸期階段代表颱風中心通過台灣陸地的時段，而離陸後階段則為颱風離開台灣地形後、颱風中心與海岸線最短距離在 100 公里以內的時段。所使用之颱風的定位資料，主要依中央氣象局定位資料，並藉由飛機、雷達及衛星觀測資料進行修正。

針對東亞夏季季風變化的部分，我們使用日本氣象廳 Japanese 55-year Reanalysis data (JRA55)，探討颱風期間的西南氣流水氣通量。此資料水平解析度為  $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ ，提供每六小時之再分析資料。在此參考 Pan et al. (2013)的方法如圖 8(a)所示，選取  $16.25 \sim 22.5^\circ \text{N}$  與  $110.0 \sim 120.0^\circ \text{E}$  的範圍計算 925 hPa 的水氣通量，做為西南氣流強度的指標。其方程式如

$$\overline{Flux} = \frac{\sum_{i=1}^N (u_i^2 + v_i^2)^{1/2} \times q_i}{N}$$

其中，水氣通量  $\overline{Flux}$  只考慮西風分量( $u > 0$ )與南風分量( $v > 0$ )。在所選定之範圍中，共有 54 個網格點被用來計算西南水氣通量。經過敏感度測試（實驗結果在此未展示），此選定之範圍可有

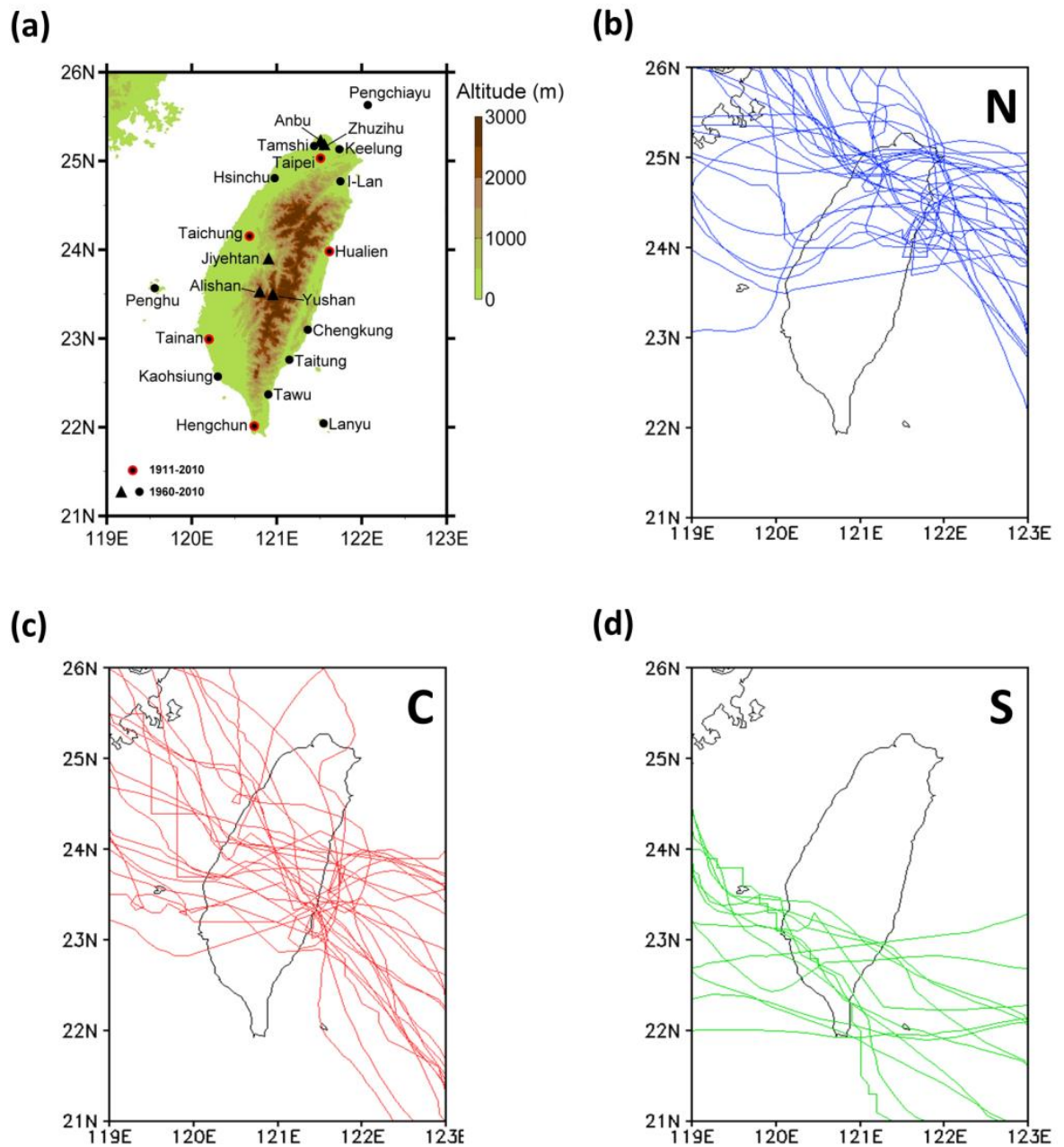


圖 1 (a)臺灣地形與 21 個雨量站地理位置，三角形代表山地測站，紅色外框之圓點代表具有百年資料之測站。(b)至(d)為 1960~2015 年西行颱風之路徑，依據中央氣象局之颱風路徑分類，分別屬於路徑 N(藍)、C(紅)和 S(綠)路徑。

效反映大尺度西南水氣傳送之特性，亦可避免颱風環流與台灣以外地形之影響，故以此範圍所計算之西南水氣通量進行統計分析。

### 三、氣候變遷下台灣颱風豪雨之變化與特性

氣候變遷下劇烈天氣的變化，是目前大氣科學最有挑戰的重要科學問題之一。在先前研究中，我們發現到台灣地區長期的颱風豪雨變化，除了全球暖化的訊號之外，同時也包含短週期的氣候震盪訊號與長週期之年代際氣候變化訊號(Chang et al. 2012)。在氣候變遷時間尺度上的颱風降雨變化趨勢，我們將過去 56 年分為前後兩個 30 年的時期，我們觀察平均每個侵台颱風的三階段降雨量都有顯著增加。表 2 顯示每年的颱風累積降雨量在三個階段，分別呈現 50%~75% 的增加，但

在統計上並無顯著的意義。但若進一步的探討每個颱風的平均降雨量，則在統計上呈現顯著的差異性；登陸前每個颱風的平均降雨量增加約 40%，登陸期與離陸後每個颱風之平均降雨總量更是增加 60%。造成每個颱風平均降雨量變化的原因可能來自降雨強度的變化或是颱風降雨延時的改變。我們進一步分析降雨強度變化趨勢，發現侵台颱風的三個不同階段之平均累積降雨強度在前/後 30 年的變化，都有增加的趨勢(表 3)。登陸前與登陸期的平均降雨強度增加 15%，離陸後平均降雨強度更是顯著增加 34%。這樣分析的結果顯示降雨強度確有增加，但改變幅度並無法完全反應颱風累積雨量之變化趨勢，這也代表颱風運動的路徑或是每個颱風平均延時的增加對於颱風降雨亦有貢獻。分析影響台灣的颱風延時，其在近 30 年期間較早期平均增加近 3 小時，而

表 2 前/後 30 年颱風侵台三個階段的平均降雨量及變化，粗體字部分通過 90% 信賴度，灰底部分通過 95% 信賴度。

	1960~1989 (46 TCs)		1986~2015 (50 TCs)		前/後 30 年變化	
	mm TC <sup>-1</sup>	mm yr <sup>-1</sup>	mm TC <sup>-1</sup>	mm yr <sup>-1</sup>	mm TC <sup>-1</sup>	mm yr <sup>-1</sup>
〔登陸前〕	583.3	894.3	816.0	1360.0	<b>+40%</b>	+52%
〔登陸期〕	693.6	1063.6	1109.6	1849.3	<b>+60%</b>	<b>+74%</b>
〔離陸後〕	496.4	761.1	792.8	1321.3	<b>+60%</b>	<b>+74%</b>

表 3 前/後 30 年颱風侵台三個階段的降雨強度及變化(總雨量除以停留時間)，灰底部分通過 95% 信賴度，淺灰色部分通過 90% 信賴度。

	颱風降雨強度(mm/hr)		
	1960~1989 年	1986~2015 年	前/後 30 年變化
〔登陸前〕	103.3 mm h <sup>-1</sup>	119.8 mm h <sup>-1</sup>	+16%
〔登陸期〕	116.3 mm h <sup>-1</sup>	133.6 mm h <sup>-1</sup>	+15%
〔離陸後〕	71.8 mm h <sup>-1</sup>	96.3 mm h <sup>-1</sup>	+34%

此一變化除了增加的趨勢外，亦存在著年代際的訊號(Su et al., 2012)。

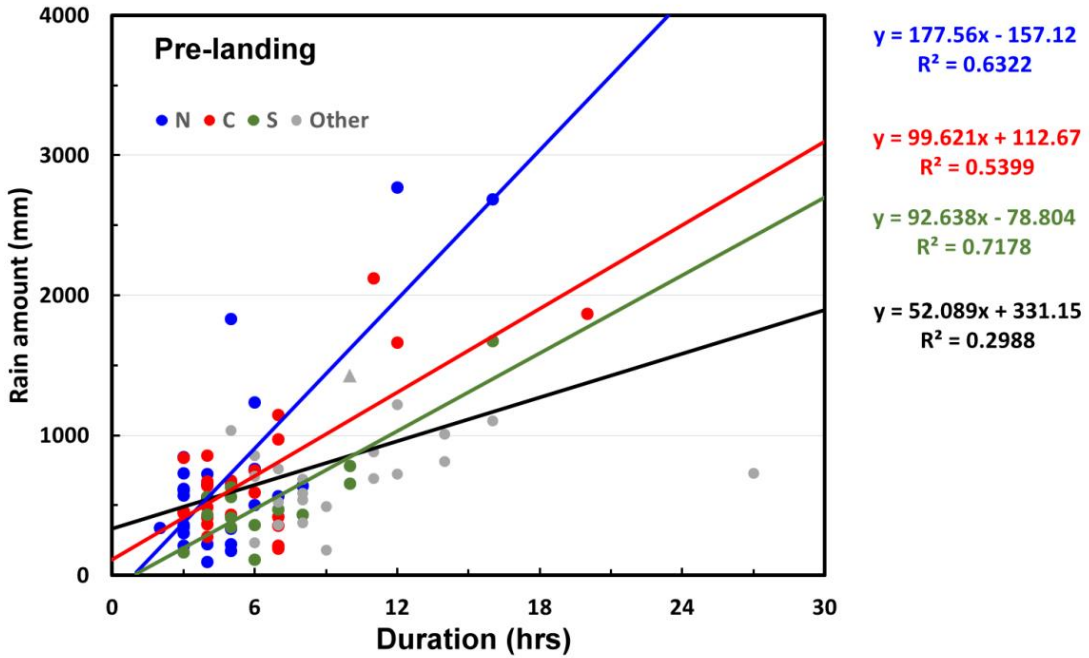
由前面的統計分析結果顯示，颱風降雨增加和颱風影響時間的增多密切相關，但不同颱風路徑的變化卻非一致。進一步分析不同颱風路徑的颱風發生頻率、颱風累積雨量、平均颱風延時、平均降雨強度的變化如表 4。路徑 N 的颱風累積雨量增幅相對最大、平均降雨強度增幅次大，雖然發生頻率呈現 29%減少，但其平均停留時間變長，從平均 15.9 小時增加為 21.6 小時。路徑 C 的平均降雨強度增幅最大，發生頻率大幅增加 2.5 倍，但平均延時則減少 24%。路徑 S 平均降雨強

度降低 2%，但颱風延時從平均 15.1 小時增加為 27.4 小時。我們進一步的分析不同階段颱風降雨和延時之關係，圖 2 為 1960~2015 年颱風在登陸前階段的累積雨量和延時的關係，顯示不論是分為路徑 N、C 和 S，兩者間都有很好的相關性，相關性分別為  $R^2 = 0.63, 0.54$  和  $0.72$ 。但如果考量全部路徑，則相關性只有  $R^2 = 0.30$ ，主要原因是此三種路徑的降雨強度都不相同。除此之外，圖 2 也顯示颱風延時超過 12 小時的個案，登陸前累積雨量和停留時間的關係的相關性也較好( $R^2 > 0.5$ )。換句話說，較長的影響時間可透過颱風環流與地形之間持續產生的交互作用，導致颱風降雨

表 4 前/後 30 年不同侵台颱風路徑之颱風個案數、累積降雨量、颱風延時與平均降雨量之變化。

TC Track		P1 1960~1989	P2 1986~2015	P2-P1
N(2)	TC numbers	17	12	-29%
	Accumulated rainfall (mm TC <sup>-1</sup> )	1916.9	3379.6	+76%
	TC durations (hrs)	15.9	21.6	+36%
	Average rain intensity (mm hr <sup>-1</sup> )	120.1	154.4	+29%
C(3)	TC numbers	6	21	+250%
	Accumulated rainfall (mm TC <sup>-1</sup> )	2450.6	2729.4	+11%
	TC durations (hrs)	28.3	21.4	-24%
	Average rain intensity (mm hr <sup>-1</sup> )	85.3	122.7	+44%
S(4)	TC numbers	9	5	-44%
	Accumulated rainfall (mm TC <sup>-1</sup> )	1117.1	1796.1	+61%
	TC durations (hrs)	15.1	27.4	+81%
	Average rain intensity (mm hr <sup>-1</sup> )	73.8	72.6	-2%
ALL	TC numbers	46	50	+9%
	Accumulated rainfall (mm TC <sup>-1</sup> )	1773.2	2700.8	+52%
	TC durations (hrs)	20.6	23.3	+13%
	Average rain intensity (mm hr <sup>-1</sup> )	92.9	115.8	+25%

(a)



(b)

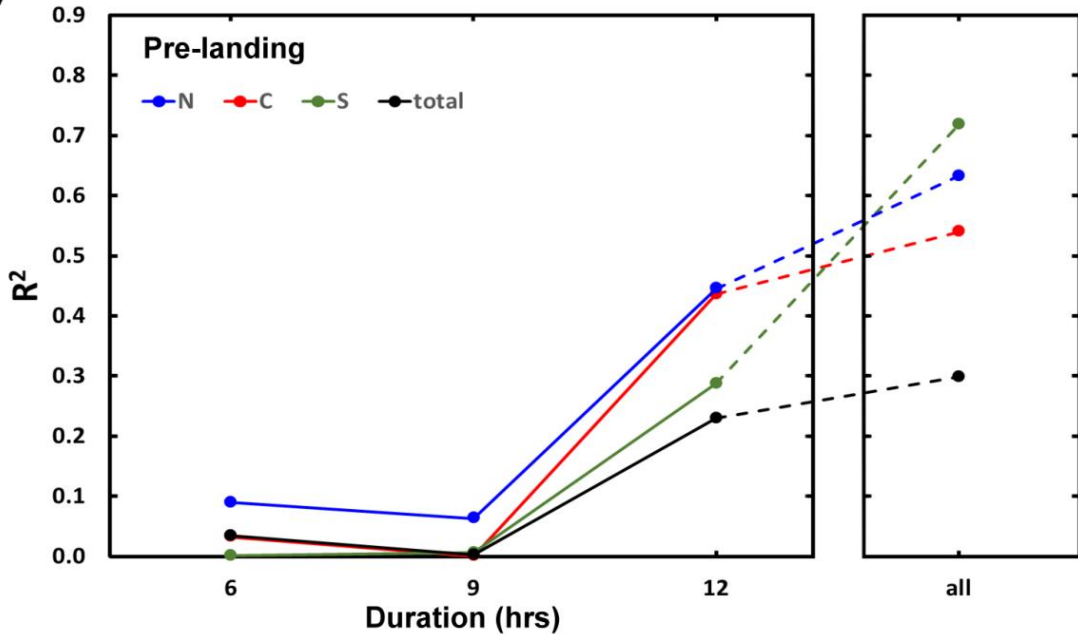


圖 2 登陸前颱風降雨和颱風延時之相關性分析。路徑 N、C 和 S 分別以藍、綠和紅色點表示，其餘他路徑包含六個特殊颱風路徑以灰色點表示，其中納莉颱風(2001)以三角形標示。藍、綠、紅和黑色實線分別表示路徑 N、C、S 及所有 91 個案之線性趨勢線。(b)不同路徑的颱風降雨與颱風延時間之判定係數，橫軸代表不同延時之個案統計，例如 6 代表登陸前之颱風延時小於 6 小時。



量明顯的增加。其中路徑 S 的颱風個案，其運動路徑上之地形相對平緩，颱風降雨受台灣地形影響最低，因此與路徑 N 和 C 個案相比相關性最差；但若颱風延時超過 12 小時，則路徑 S 的相關性增加最明顯。以上的統計分析結果顯示了偏北路徑之颱風降雨強度確有增加的趨勢且颱風數量也有明顯的改變，這樣的結果呼應先前一些研究中所顯示的颱風可以在氣候變遷的情境下受到行星尺度至大尺度的環境條件改變，導致局地之大氣環流發生變化，進而改變颱風發生頻率或運動的特性(Tu et al., 2009; Chou et al., 2010; Wang et al., 2012)。而颱風運動特性的變化如何影響颱風豪雨事件，還有哪些大尺度系統會影響颱風的極端降雨，都將在下一章節進行探討。

#### 四、不同階段之颱風運動、地形與西南氣流對颱風降雨之影響

一般來說，受到地形與颱風環流的影響，颱風豪雨在登陸期為最多。但進一步分析颱風運動路徑上三個不同階段的颱風極端降雨(圖 3(a))，我們發現部分的颱風在登陸前與離陸後的極端降雨高於平均值一個標準差以上，其所代表之意義為颱風極端降雨在登陸前或離陸後的期間更為顯著，我們稱之為登陸前主導與離陸後主導之個案，而這些颱風同時也都屬於前 15 大颱風降雨之個案。屬於登陸前主導的個案，包含了 1992 年寶莉颱風、2005 年海棠颱風、2007 年柯羅莎颱風與 2008 年辛樂克颱風。圖 3(b)顯示這些登陸前主導的颱風個案皆有一相似的運動軌跡，就是在登陸前於台灣東岸發生路徑的偏折，導致颱風中心在外海呈現打轉現象。這樣的颱風路徑，使登陸前颱風的延時變長，進一步導致這段時期極端降雨發生的頻率增加，也使累積降雨變多。而導致颱

風運動路徑發生偏折的原因，則是受到颱風與台灣地形交互作用的影響，相關的物理機制包含了颱風的通道效應(e.g. Jian and Wu, 2008; Huang et al., 2011; Wu et al., 2015)、地形阻擋效應(e.g. Lin et al. 2005; Liu et al. 2016; Lin et al. 2016)、颱風非絕熱效應(Wang et al., 2012; Hsu et al, 2013)等各種可能性。

當颱風中心登陸之後，颱風環流受到地形的影響最大，颱風的平均降雨強度也最大，但並非所有颱風個案都會產生極大的降雨量。圖 4 為登陸期間颱風累積雨量、颱風移行速度與颱風強度的關係圖。我們發現與表 1 相似，降雨量較大的颱風多發生在近期，而移速慢的颱風的降雨量要比移速快的多。此外，強降雨的個案其登陸的緯度大部分都在北緯 23.5 度以北，降雨量與颱風強度卻無顯著的關係(圖 5)。進一步的分析，累積降雨量與登陸期間延時為正相關( $R = 0.85$ )，與登陸期間移行速度之倒數亦為正相關( $R = 0.69$ )。換句話說，移行速度越慢的颱風其颱風延時也越長，所伴隨的累積降雨量越大，我們也發現若不考慮副中心取代之個案，在過去 56 年間登陸期間移速較慢的颱風個案有 79% (14 個個案中有 11 個)是由台灣東岸北側登陸，而較快的颱風則有 64% (11 個個案中有 7 個)由南側登陸，在此快／慢移行颱風之分類標準為平均移速之正負一個標準差(圖 6)。分析這些颱風個案在登陸前 12 小時到離陸後 12 小時期間之平均移速的變化，可以發現強降雨與移行速度緩慢之個案隨著颱風中心接近地形，登陸前有相對較緩慢的移速，且在登陸期會變得更慢(圖 7)，也進一步導致更多降雨。Hsu et al. (2013) 利用 Weather Research and Forecasting model (WRF) 進行數值實驗，探討導致颱風移行速度降低的機制。研究顯示由北側登陸

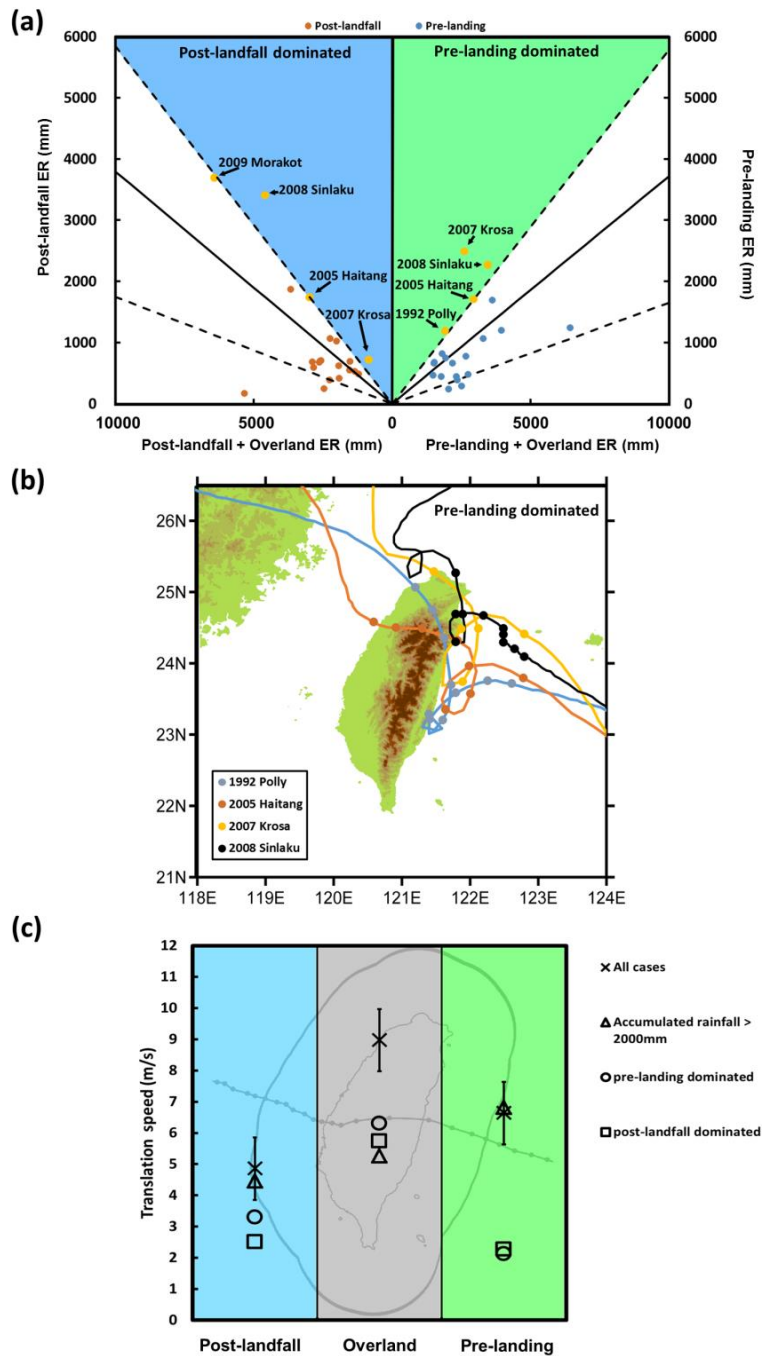


圖 3 登陸前、登陸期間、離陸後之極端降雨佔比與個案特性。(a)累積極端降雨大於 2000mm 之個案，登陸前與離陸後之颱風降雨相較於登陸期間的降雨佔比，以黃色標示颱風在登陸前或離陸後降雨顯著之個案，綠色區域標示為登陸前主導個案，藍色標示為離陸後主導個案。(b)登陸前主導個案之路徑特性，四個案皆在登陸前具有打轉之特殊路徑。圓點標示颱風靠近台灣海岸線 100km 至離陸期間每三小時之中心位置。(c)登陸前、登陸期間、離陸後颱風移速之統計分析，x 代表所有颱風個案之平均移速，同時標示其標準差範圍。三角形符號代表累積降雨大於 2000mm 之強降雨個案，圓形與方形分別代表登陸前主導與離陸後主導之個案。

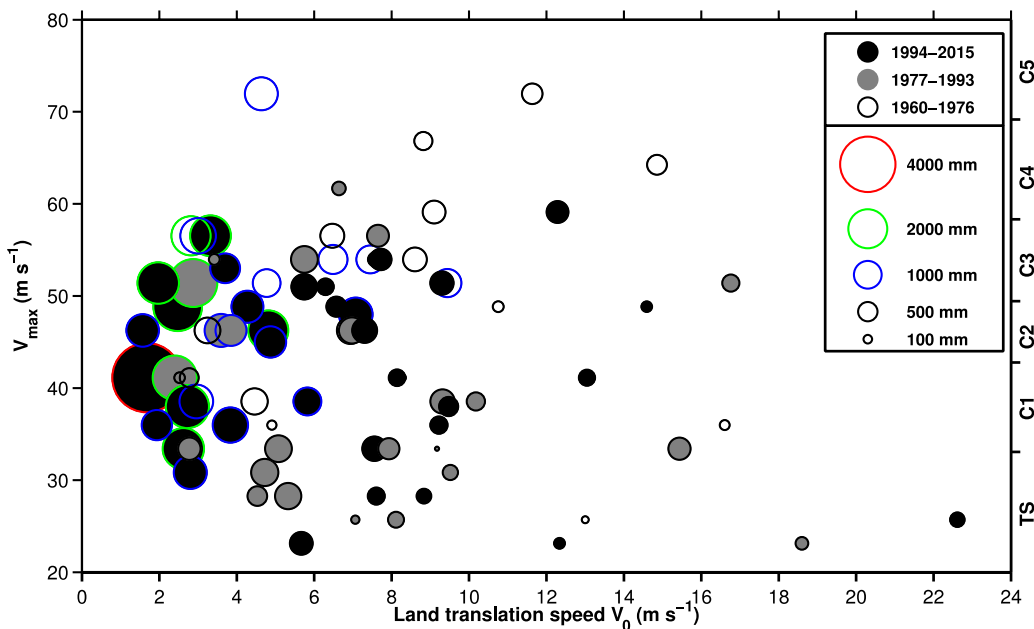


圖 4 颱風登陸期間累積雨量與颱風移行速度、強度（最強風速）的關係。圖中包含過去 56 年(1960~2015)西行颱風資料，圓圈大小代表降雨量多寡，黑實、灰實與空心點代表由近而遠不同時期之降雨量值，並以顏色強調極端降雨值。縱軸代表颱風強度，橫軸為登陸期間之颱風移速。圖中顯示移速慢才是颱風累積降雨量大的主要因素，強度強的颱風累積雨量不一定特別多，近年颱風降雨量顯著增加。

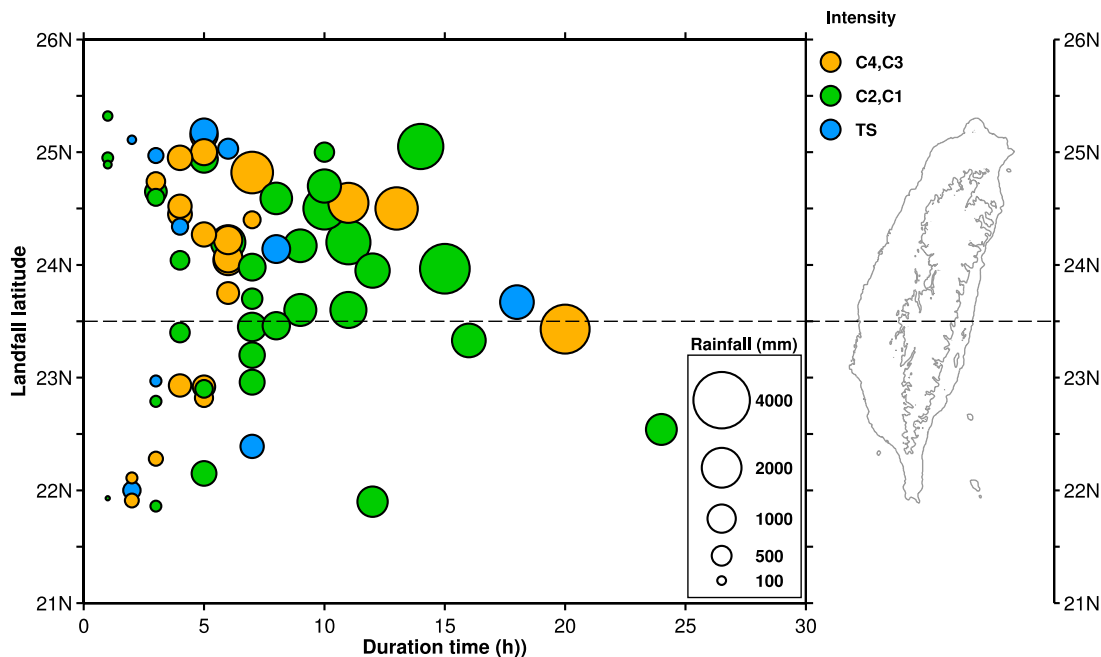


圖 5 1960~2015 年間，颱風侵台時間、登陸緯度與降雨量的關係圖。縱軸為颱風登陸緯度，橫軸為登陸期間之颱風停留時間，圓圈大小代表降雨量多寡，以顏色區別颱風強度。圖中未標示納莉颱風個案資訊，其由北緯 25 度處登陸，侵台時間為 51hrs，測累積降雨量為 6281.6mm。

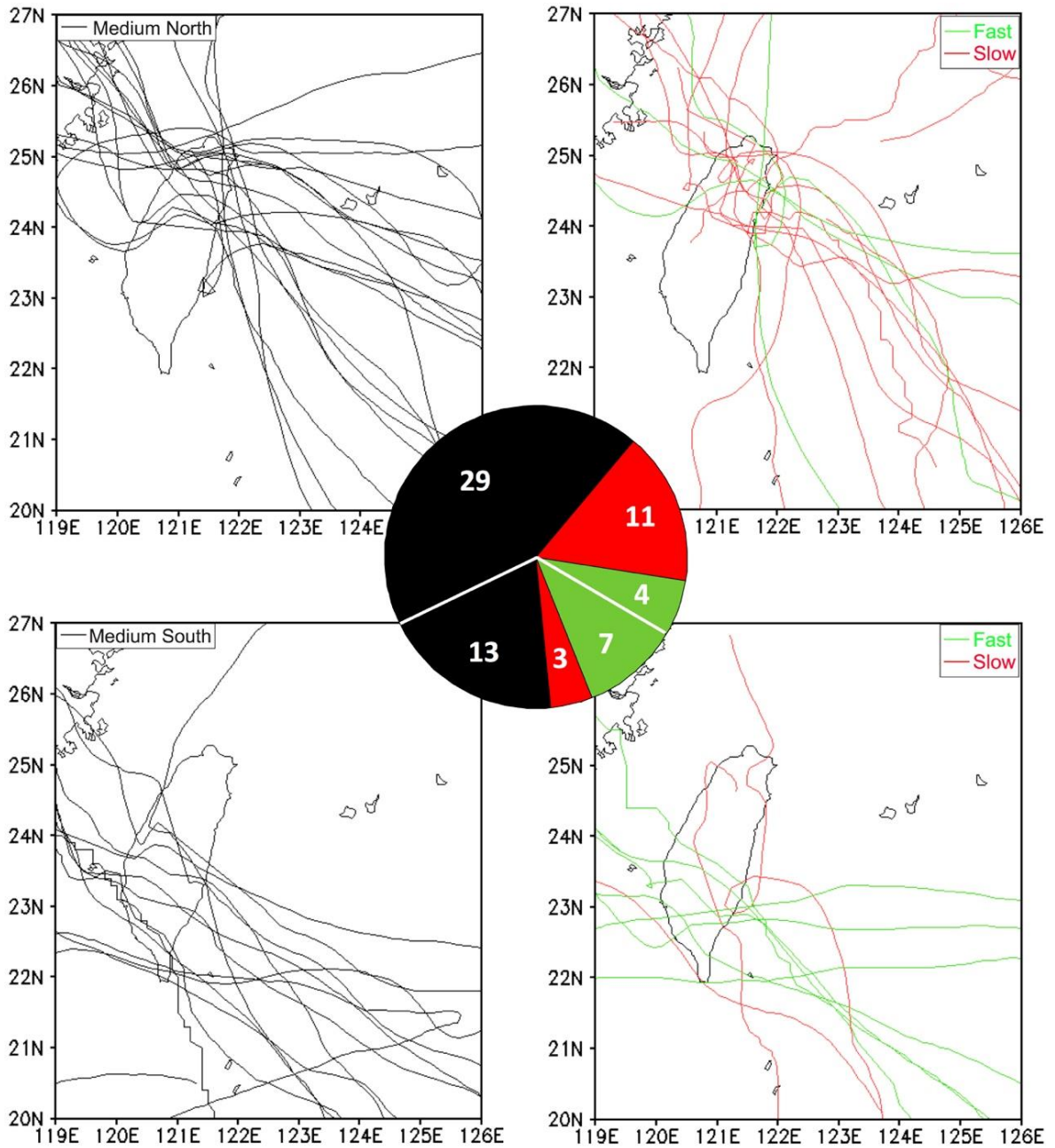


圖 6 將 1060~2015 年所有登陸台灣之西行颱風個案，依據台灣東岸中間點北緯 23.5 度將颱風分為北（上）南（下）路徑；右圖為登陸移速大（小）於一個標準差之個案，以紅（綠）色代表快（慢）群組；左圖則為一個標準差之內之平均移速颱風個案路徑。圓餅圖數字代表南北路徑之各移速分類的個案數目。圖顯示移速較慢（較快）的颱風容易發生在北（南）邊登陸區。

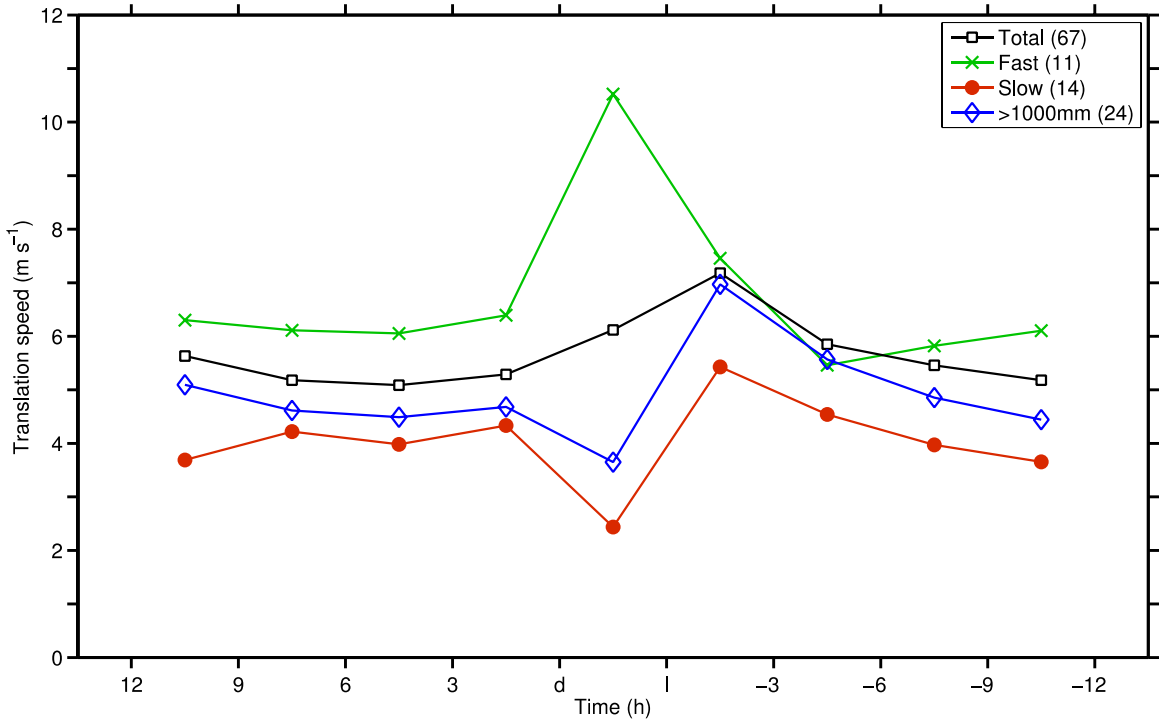


圖 7 1960~2015 年間，西行颱風登陸前後颱風移行速度變化。紅（綠）色為低（高）於一個標準差之慢（快）移速群組，藍色線為雨量大於 1000 mm 群組的颱風移速，黑色線為所有登陸颱風的移速變化。個案數目位於右圖標上。可發現紅色與藍色線之變化趨勢一致，代表移速慢或降雨量大之颱風，登陸後移速會降低，亦會導致更多降雨。

且移速緩慢的颱風，其環流會在中央山脈南側地形上產生不對稱對流降雨，透過非絕熱過程產生不對稱的位渦趨勢，進而引導颱風移速減慢。換句話說，移速慢且路徑偏北之颱風個案，受地形影響造成累積降雨越大，有可能透過地形鎖定效應產生不對稱的降雨，導致颱風移行速度更慢、降雨時間更長，是一正回饋機制。這種非對稱對流之非絕熱機制，在颱風離陸後亦扮演影響颱風移速之重要角色。這也解釋了台灣颱風極端降雨的變化中，單純由全球暖化熱力機制所導致的極端降雨氣候變遷訊號，可能會因為中、小尺度強烈的地形效應而被掩蓋。氣候變遷對颱風極端降雨的影響，需要間接透過改變大氣海洋環境條件與大尺度環流，進一步的影響颱風的降雨。

與登陸前和登陸期相比，路徑 N 和 C 在颱風離陸後的降雨強度近乎一致，這表示在颱風離陸後之雨量較不受到地形影響。在此一階段，颱風降雨除了與移行速度有關外，亦與夏季的西南氣流有關。以 2009 年的莫拉克颱風為例，夏季西南氣流和颱風環流共伴形成輻合帶是造成持續降雨主因。圖 8(a)為莫拉克颱風離陸後的 925 hPa 西南氣流水氣通量及風場，豐沛的水氣不斷向北輸送可能是造成此期間強降雨的主因。因為西南氣流為東亞夏季季風之一部分，故在此針對 6~8 月路徑 N·C 和 S 共 48 個侵台颱風進行分析探討水氣通量(SWF)和水氣輸送總量(TSWF，為 SWF 和離陸後颱風延時乘積)與颱風降雨量及降雨強度的相關性。圖 9 顯示離陸後之總降雨量和 TSWF

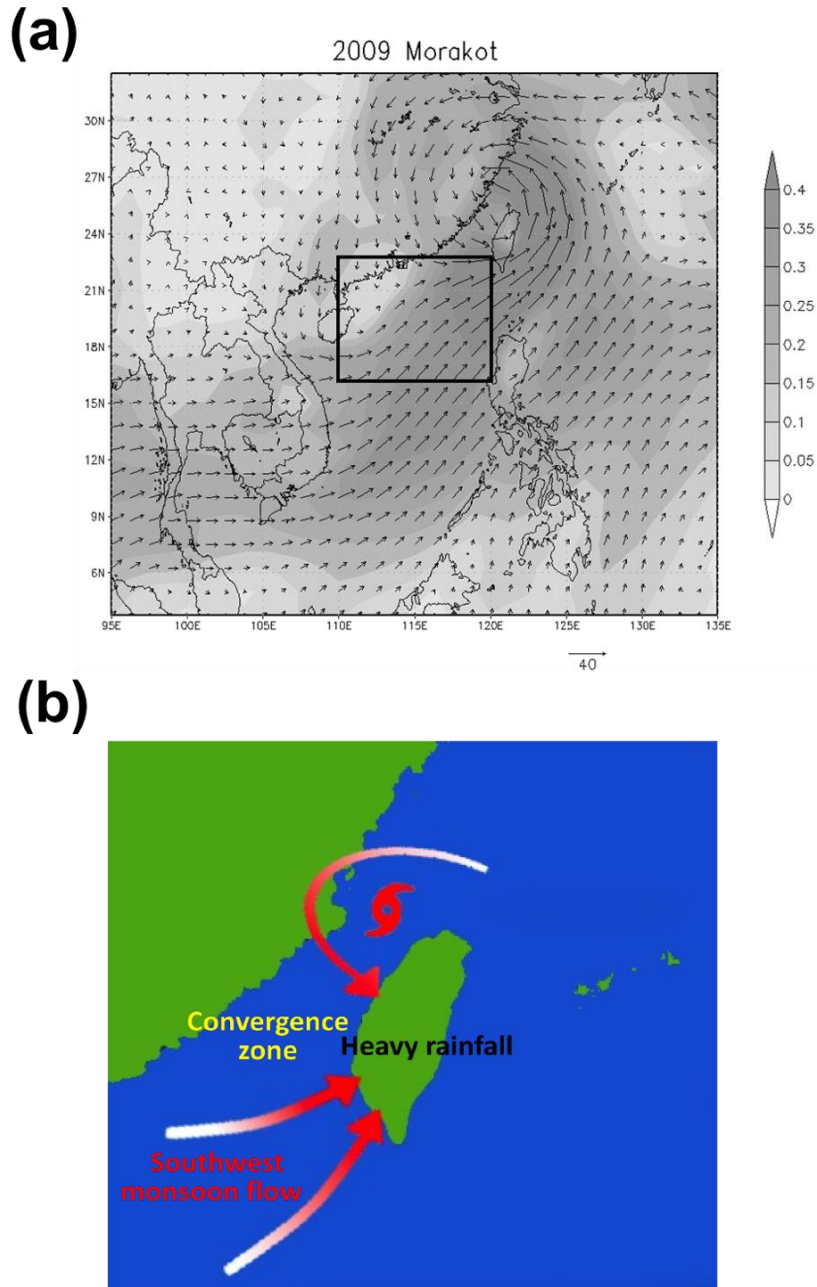


圖 8 (a)莫拉克颱風(2009)離陸後 925 hPa 平均風場 (箭頭,  $\text{m s}^{-1}$ ) 和平均水氣通量 (灰色,  $\text{m s}^{-1}$ )。以黑色長方形區域( $16.25\text{--}22.5^\circ\text{N}$ ,  $110.0\text{--}120.0^\circ\text{E}$ )是計算西南水氣通量 SWF 的範圍。(b)颱風與夏季西南季風(southwest monsoon flow)交互作用示意圖。兩者交互作用於臺灣西側輻合(convergence zone), 並進一步受台灣地形舉升在山區造成大量降雨(heavy rainfall)。

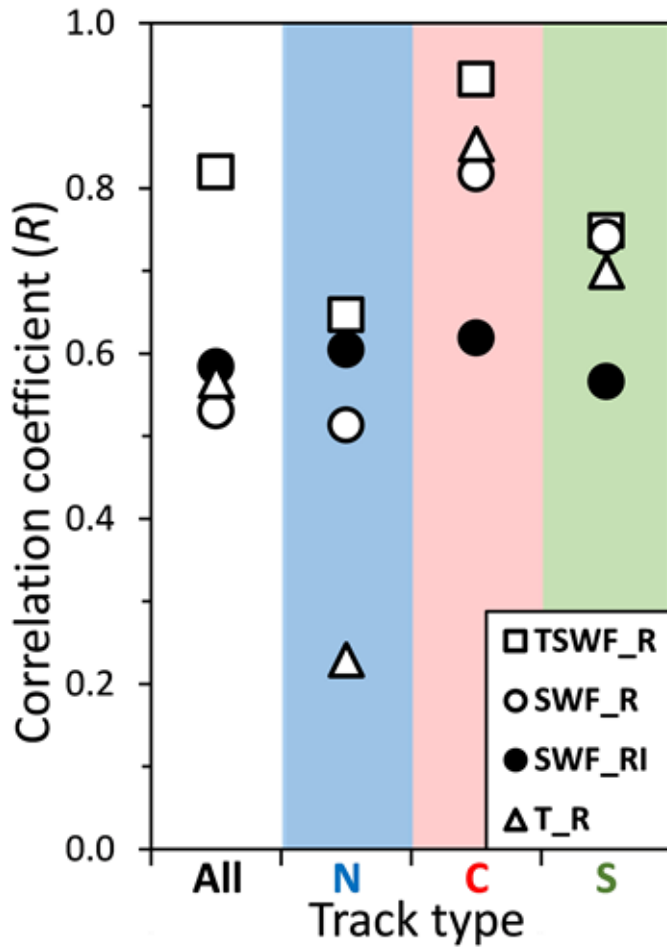


圖 9 1960~2015 年夏季 6 至 8 月颱風離陸後總降雨量(R)和水氣輸送總量(TSWF)、西南季風水氣通量(SWF)及颱風停留時間(T)的相關性，依颱風路徑分為總路徑 (All, 黑) 及路徑 N (藍)、C (紅)、S (綠)。黑色實心代表颱風降雨強度(RI)和 SWF 的相關性。

有高度正相關性，西南季風水氣輸送以及颱風移速兩者的綜合作用，對於離陸後階段台灣降雨有很大影響。過程中也包括西南季風水氣使降雨增大，進而使颱風移速減慢的非線性降雨正回饋機制。然而此正回饋機制多見於路徑 C 及 S 颱風，路徑 N 颱風因具有通過北台灣之偏北路徑，使 SWF 對雨量的影響有限，此路徑颱風的雨量和其移速快慢的相關性也較低。圖 9 也顯示降雨強度會受到 SWF 影響，與各路徑颱風皆維持有 0.6 相關性。

過去相關研究顯示太平洋副熱帶高壓可影響颱風路徑，而此副熱帶高壓在近年代有向西南延伸的趨勢，Chu 等人(2012)研究更顯示副熱帶高壓向西南延伸的時段和高壓南緣減弱的向西駛流發生時段一致，減弱的駛流增加了颱風移速變慢的機會，可能進一步造成颱風豪雨(Hsu et al. 2013)。JRA55 再分析資料顯示 500 hPa 等壓面上 5870 gpm 等高線於近年代有向西南延伸的現象 (圖 10)，副熱帶高壓向西南延伸亦有可能影響西行颱風登陸的南北位置，過去 56 年登陸台灣的颱風，

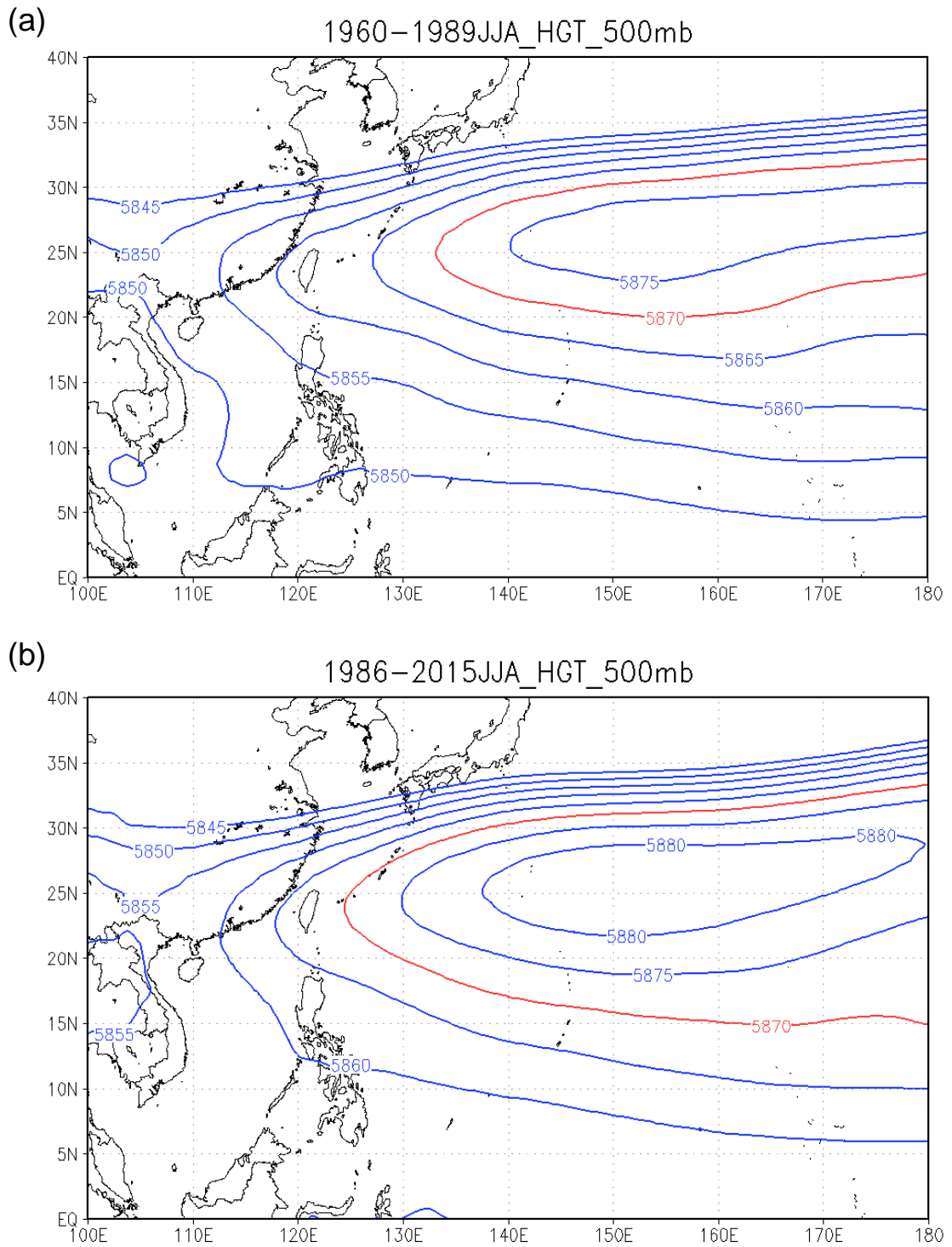


圖 10 (a) 1960~1989 年夏季 6 至 8 月 500 hPa 等高面上重力位高度等值線分布，紅色等值線代表 5870 gpm。  
(b) 同(a)，但為 1986~2015 年結果。



前 30 年多屬路徑 N，於 21 個颱風個案中有 13 個，路徑 C 颱風僅有 2 個，路徑 S 颱風有 6 個；相較於此，後 30 年的侵台颱風多屬於路徑 C 類別，此類型颱風於 27 個颱風個案中有 15 個，路徑 N 颱風有 8 個，路徑 S 颱風僅有 4 個(圖 11)，然而副熱帶高壓對台灣颱風路徑變化的影響還需要更多研究探討。由此可知，除了因為夏季西南氣流增強，導致離陸後階段颱風降雨量及降雨強度增加，也因為近 30 年路徑 C 颱風數量變多，使得離陸後階段颱風降雨的增加更為顯著。

### 五、結果與討論

根據以上的分析，我們發現台灣地區颱風的極端降雨事件在近 30 年(1986-2015)期間相較於早期(1960-1989)，確實有上升的趨勢，同時期變

異的程度亦有顯著的增加，而最強的 15 個颱風個案中亦有 67%發生在 2000 年之後(93%發生在近 30 年)。這段時期影響台灣的颱風個數並無顯著的變化，而造成極端降雨變化的機制，則主要來自於颱風運動路徑的改變與大尺度環境條件的變化兩個方面。Tu et al. (2009)、Chou et al. (2010)和 Wang et al. (2012)的研究中，都指出在全球暖化的情境下，西北太平洋的海表面溫度的上升可能導致颱風路徑向北移，主要移動路徑偏向中緯度的東亞地區，而較偏南向南海移動的西行颱風路徑則會減少。但本研究中所顯示之路徑變化，N、C 和 S 之間的差異僅約 100 公里，我們並無法直接將這三種路徑的年代際變化歸咎為此因。同時路徑 N 和 S 之颱風個數在這段時期都呈現減少的現象，只有路徑 C 增加，換言之並非所有偏北路徑

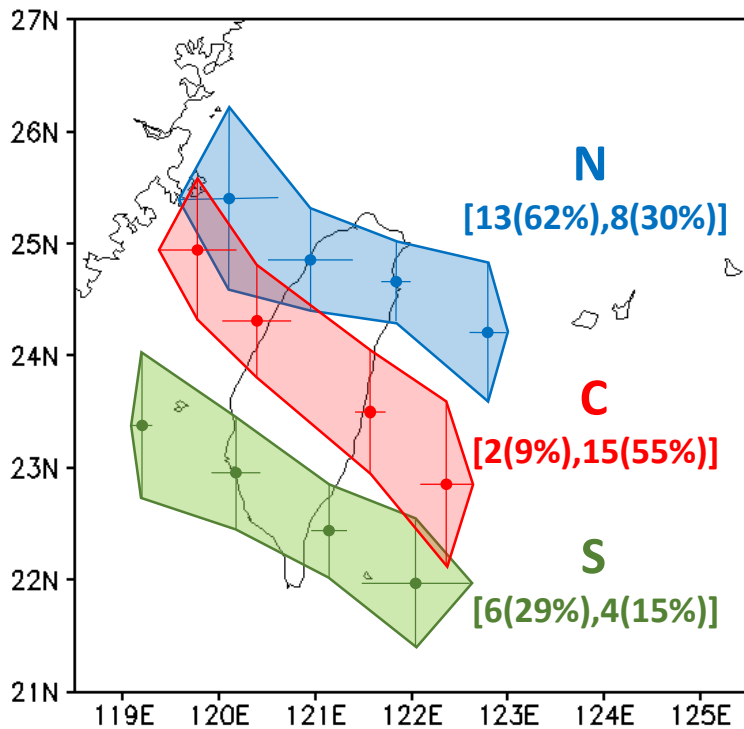


圖 11 1960~2015 年夏季 6 至 8 月路徑 N (藍)、C (紅) 和 S (綠) 分布圖，陰影區為一個標準差內之路徑範圍。括號內數字組為前/後 30 年的颱風數目，例如路徑 C 前/後 30 年的數目分別是 2 與 15。

之颱風數目都呈現增加的趨勢，因此不同路徑之颱風其個數年代際變化的主因，仍缺少足夠的科學證據說明其與全球暖化之關係。

根據長期的氣候資料分析顯示，在這段時期台灣附近有兩個主要的大尺度系統變化可能會影響颱風的運動與降雨。其中一個是西北太平洋地區的副熱帶高壓勢力範圍產生變化，同時也導致影響颱風運動的駛流場發生改變(Chu et al. 2012, Zhao and Wu 2014)。我們利用 JRA55 再分析資料顯示西北太平洋地區的副熱帶高壓範圍變大，且台灣附近之氣壓梯度也有降低的現象，換言之，台灣附近的颱風駛流強度也會減弱。這樣的變化趨勢，與我們分析颱風延時的變化相同。同時副熱帶高壓範圍擴大也可能導致原先偏北路徑之颱風運動發生改變，因路徑 N 之颱風駛流場位在高壓脊內側，駛流減弱會導致颱風移動速度變慢，亦可能進一步透過地形鎖定的正回饋效應，使颱風影響的延時增加，同時也伴隨更多的極端降雨事件。同樣的，中間偏北之路徑 C 颱風數目增加，也可能受到近 30 年副熱帶高壓範圍擴大所導致，所以近年的颱風強降雨事件更為顯著。

另一個大尺度變化為台灣附近的西南季風有增強的趨勢，這導致台灣西南側會有更多由熱帶地區所傳送的水氣通量。在颱風降雨與西南氣流的分析中，我們發現在離陸後颱風的降雨與西南水氣通量的相關性較高。換言之，由熱帶地方透過西南季風傳送之水氣越多，則颱風的極端降雨也越顯著。關於西南季風變化的研究，Wang et al. (2012)利用 ERA-40 再分析資料探討近 30 年來全球夏季季風環流增強的現象，發現季風區過去 30 年降雨變強，而位於東亞季風區西北方的沙漠氣候區域則是雨量減少，而東亞季風降雨區的北方與東北方，在過去 30 年也是變乾、降雨減少。這

個觀測顯示季風降雨與沙漠降雨的動力耦合性，也就是季風降雨增加，透過潛熱釋放浮力增加，從而增加高層大氣的質量，以 Rossby wave 往西北方向傳送，強化沙漠區高壓系統，從而減少其降雨。這樣的降雨重新分配的現象，分別代表了沃克環流(Walker circulation)與局部哈德雷胞(Hadley cell)的加強，導致季風區更濕、沙漠區更乾。換言之，這就是類似 Neelin et al. (2006)研究中所提出之豐者越豐(rich-gets-richer)機制，我們在東亞季風區所看到的降雨越多的區域水氣更多(wet-gets-wetter)，而原本降雨偏少的地區則更趨乾燥(dry-gets-drier)，這是符合於氣候變化的預測趨勢。

颱風本身的環流與地形間的交互作用在颱風極端降雨事件的變化上，則扮演了最重要的角色。透過地形鎖定效應(Chang et al. 1993; Wang et al. 2012)，在颱風接近台灣時會產生不對稱之對流結構，導致不均勻的極端降雨分布。而降雨過程中所伴隨之不對稱非絕熱效應，則會影響颱風之位渦趨勢變化，使得颱風移動的速度發生改變。這種颱風對流分布所產生的正回饋機制，在移行速度緩慢的颱風中更為顯著，會進一步降低颱風的移速或使颱風路徑發生偏折，增加颱風影響的時間。但是在快速移動的颱風中，颱風的移速則主要受到大環境駛流控制，所以不對稱對流對颱風運動所產生的影響是相對弱勢。對於影響台灣地區的颱風而言，移速慢的颱風會受到地形影響使其移動的速度更慢(slow-gets-slower)，也因此伴隨更多極端降雨事件的發生。而颱風對流的不對稱結構與持續性之中尺度對流系統生成的機制與過程有關，這也是影響颱風降雨延時與降雨強度的重要因子(Wang et al. 2012)。

由以上的討論中，我們可以發現影響近年颱

風豪雨增加的大尺度現象與在全球暖化情境下所推估之季風及熱帶環流減弱現象並不一致。換言之，台灣的極端降雨變化趨勢並非完全受到全球暖化單一機制的影響。Wang et al. (2013)利用數值模式實驗模擬，他們發現季風的增強與超強聖嬰(Mega-ENSO)和大西洋年代際振盪(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)等自然年代際變化現象成正相關。也就是說，單純人為因素導致的全球暖化效應，對於台灣地區颱風豪雨的變化影響有限，近期 Wang et al. (2015)和 Prof. C. T. Chen (2017, personal connection)透過數值模擬或氣候模式推估分析的研究中都顯示，全球暖化效應對於颱風降雨增加的貢獻只佔了整體的 15% ~ 25%，還有 75~85%的颱風降雨變化無法直接歸因於溫室氣體增加所導致。

綜合以上針對過去台灣地區颱風豪雨研究的回顧與討論，我們可以得知在近期颱風極端降雨增強的趨勢中，中小尺度對流機制、綜觀尺度颱風的不對稱結構、颱風移動路徑的偏移與大尺度環流系統的變化都扮演了極為重要的角色。透過許多科學的研究證據與分析結果顯示，全球暖化對於台灣地區颱風降水增強、颱風路徑變化和停留時間變化，並非最重要的影響因素。單純人為因素之全球暖化效應在台灣複雜地形的影響下，其訊號可能會被颱風運動特性變化與地形效應的訊號所覆蓋，所以颱風對流結構、運動特性的變化機制才是影響近年台灣地區颱風豪雨變化的重要因素。

## 致謝

本文感謝張智北教授提供許多寶貴的建議，與邱炳魁先生協助資料處理與繪圖。感謝科技部自然司多年長期資助(計畫編號: MOST 104-2111-

M-002-002-MY3, MOST 105-2111-M-034-003, MOST 106-2119-M-002-016, MOST106-2111-M-034-005), 使得研究得以持續。感謝中央氣象局與國家實驗研究院颱風與洪水研究中心-大氣水文資料庫協助提供長期測站氣象資料。

## 參考文獻

- Chang, C.-P., Y. Lei, C.-H. Sui, X. Lin, and F. Ren, 2012: Tropical cyclone and extreme rainfall trends in East Asian summer monsoon since mid-20th century. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L18702.
- Chang, C.-P., Y.-T. Yang, and H.-C. Kuo, 2013: Large increasing trend of tropical cyclone rainfall in Taiwan and the roles of terrain. *J. Clim.*, **26**, 4138-4147.
- Chien, F.-C. and H.-C. Kuo, 2011: On the extreme rainfall of Typhoon Morakot (2009). *J. Geophys. Res.*, **116**, D05104.
- Chou, C., J.-Y. Tu, and P.-S. Chu, 2010: Possible impacts of global warming on typhoon activity in the vicinity of Taiwan. *Climate Change and Variability*, S. Simard, Ed., InTech, 79-96.
- Chu, P.-S., J.-H. Kim, and Y. R. Chen, 2012: Have steering flows in the western North Pacific and the South China Sea changed over the last 50 years? *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L10704.
- Fujibe, F., N. Yamazaki, and K. Kobayashi, 2006: Long-term changes of heavy precipitation and dry weather in Japan (1901-2004). *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 1033-1046.

- Ge, X., T. Li, S. Zhang, and M. S. Peng, 2010: What causes the extremely heavy rainfall in Taiwan during Typhoon Morakot (2009)? *Atmos. Sci. Lett.*, **11**, 46-50.
- Goswami, B. N., V. Venugopal, D. Sengupta, M. S. Madhusoodanan, and P. K. Xavier, 2006: Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment. *Science*, 314, 1442-1445.
- Haylock M. R., T. C. Peterson, L. M. Alves, T. Ambrizzi, Y. M. T. Anunciacao, J. Baez, V. R. Barros, M. A. Berlato, M. Bidegain, G. Coronel, V. Corradi, V. J. Garcia, A. M. Grimm, D. Karoly, J. A. Marengo, M. B. Marino, D. F. Moncunill, D. Nechet, J. Quintana, E. Rebello, M. Rusticucci, J. L. Santos, I. Trebejo and L. A. Vincent, 2006: Trends in total and extreme south American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. *J. Climate*, 19, 1490-1512.
- Hsu, L.-H., H.-C. Kuo, and R. G. Fovell, 2013: On the geographic asymmetry of typhoon translation speed across the mountainous island of Taiwan. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 1006-1022.
- Huang, Y.-H., C.-C. Wu, and Y. Wang, 2011: The influence of island topography on typhoon track deflection. *Mon. Weather Rev.*, **139**, 1708-1727.
- Jian, G.-J. and C.-C. Wu, 2008: A numerical study of the track deflection of Supertyphoon Haitang (2005) prior to its landfall in Taiwan. *Mon. Weather Rev.*, **136**, 598-615.
- Karl, T. R., and R. W. Knight, 1998: Secular trend of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 231-242.
- Lau, K. M., and H. T. Wu, 2007: Detecting trends in tropical rainfall characteristics, 1979-2003, *Int. J. Climatol.*, 27, 979-988.
- Lee, C.-S., C.-C. Wu, T.-C. Chen Wang, and R. L. Elsberry, 2011: Advances in understanding the "perfect monsoon-influenced typhoon": Summary from International Conference on Typhoon Morakot (2009). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 213-222.
- Lin, Y.-L., S.-H. Chen, and L. Liu, 2016: Orographic effects on track deflection of an idealized tropical cyclone passing over a mesoscale mountain range. *J. Atmos. Sci.*, **73**, 3951-3974.
- Liu L, Y.-L. Lin and S.-H., Chen, 2016: Effects of Landfall Location and Approach Angle of an Idealized Tropical Cyclone over a Long Mountain Range. *Front. Earth Sci.* 4:14.
- Neelin, J. D., M. Muˆnnich, H. Su, J. E. Meyerson, and C. E. Holloway (2006), Tropical drying trends in global warming models and observations, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **103**, 6110-6115.
- Pan, T.-Y., Y.-T. Yang, H.-C. Kuo, Y.-C. Tan, J.-S. Lai, T.-J. Chang, C.-S. Lee, and K. H. Hsu, 2011: Improvement of Statistical Typhoon Rainfall Forecasting with ANN-Based Southwest Monsoon Enhancement. *TAO*, **22**, 633-645.

- Pan, T.-Y., Y.-T. Yang, H.-C. Kuo, Y.-C. Tan, J.-S. Lai, T.-J. Chang, C.-S. Lee, and K. H. Hsu, 2013: Improvement of watershed flood forecasting by typhoon rainfall climate model with an ANN-based southwest monsoon rainfall enhancement. *J. Hydrol.*, **506**, 90-100.
- Peralta-Hernández A. R., R. C. Balling, Jr. and L. R. Barba-Martínez, 2009: Comparative analysis of indices of extreme rainfall events: Variations and trends from southern México. *Atmósfera*, **15**, 147-164.
- Piao, S., P. Ciais, Y. Hung, Z. Shen, S. Peng, J. Li, L. Zhou, H. Liu, Y. Ma, Y. Ding, p. Friedlingstein, C. Liu, K. Tan, Y. Yu, T. Zhang, and J. Fang, 2010: The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, **467**, 43-51.
- Salinger M. J. and G. M. Griffiths, 2001: Trends in New Zealand daily temperature and rainfall extremes. *Int. J. Climate*, **21**, 1437-1452.
- Su, S.-H., H.-C. Kuo, L.-H. Hsu, and Y.-T. Yang, 2012: Temporal and Spatial Characteristics of Typhoon Extreme Rainfall in Taiwan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**, 721-736.
- Tolika K., Chr. Anagnostopoulou, P. Maheras, and H. Kutiel, 2007: Extreme precipitation related to circulation types for four case studies over the Eastern Mediterranean. *Adv. Geosci.*, **12**, 87-93.
- Tu, J.-Y., C. Chou, and P.-S. Chu, 2009: The abrupt shift of typhoon activity in the vicinity of Taiwan and its association with western North Pacific-East Asian climate change. *J. Climate*, **22**, 3617-3628.
- Wang, B., J. Liu, H.-J. Kim, P. J. Webster, and S.-Y. Yim, 2012: Recent change of the global monsoon precipitation (1979-2008). *Clim. Dyn.*, **39**, 1123-1135.
- Wang, B., J. Liu, H. J. Kim, P. J. Webster, S. Y. Yim, and B. Xiang, 2013: Northern Hemisphere summer monsoon intensified by mega-El Niño/southern oscillation and Atlantic multidecadal oscillation. *Proc Natl Acad Sci.*, **110**, 5347-5352.
- Wang, C.-C., H.-C. Kuo, Y.-H. Chen, H.-L. Huang, C.-H. Chung, and K. Tsuboki, 2012: Effects of asymmetric latent heating on typhoon movement crossing Taiwan: The case of Morakot (2009) with extreme rainfall. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 3172-3196.
- Wu, C. - C., T.-H. Li, and Y.-H. Huang, 2015: Influence of mesoscale topography on tropical cyclone tracks: Further examination of the channeling effect. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 3032-3050.
- Zhao, H. and L. Wu, 2014: Inter-decadal shift of the prevailing tropical cyclone tracks over the western North Pacific and its mechanism study. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **125**, 89-101.

## 附錄：長期氣象資料的時空特性對極端天氣事件分析之影響

本研究在分析與討論的過程中，對於觀測資料應用在氣候變遷下極端天氣事件研究的一些限制與難處將在此作為討論。在這些相關的研究中，其研究分析所使用的資料可以分為兩個主要的來源，一種是是由儀器觀測所取得的觀測記錄，另一種則是將觀測資料透過氣候模式模擬所產製的再分析資料。使用再分析資料的優點在於資料本身已經是網格資料，其格式與資料品質相對穩定，且能同時取得長時間的全球模擬資訊，可以同時針對不同區域的極端天氣事件變化進行分析。但再分析資料本身會受到氣候模式本身特性與限制，以台灣區域的資料時空解析度並不如儀器觀測資料，且同時也存在著一定程度的模式偏差。倘若使用儀器觀測資料進行分析，雖然資料的解析度較佳，也能反映真實的天氣事件記錄，但同時也必須考慮到資料時空分布不均勻性與資料品質變化等問題。

針對儀器觀測資料的時空分布不均勻性的問題，這是進行長期氣候資料分析時經常遇到的問題。雖說台灣地區是全球氣象儀器觀測密度最高的地區之一，但早期因為觀測技術與資源等限制，氣象儀器觀測的空間分布主要集中在人類活動較為頻繁的區域，而偏遠的地區如山區等地方則相對較少資料。這樣的現象在 90 年代之後，因為自動觀測設備的普及化，在雨量資料的空間分布上有大幅的改進，對於中小尺度之降雨系統有更為精準的掌握，對於與地形效應相關的降雨機制研究有很大的幫助（圖 A1）。如果由可用連續觀測資料數的時序列變化來看，可以瞭解到儀器觀測與模式再分析資料不同，其具有不可回溯的特性，故一旦資料發生不連續的現象，在長期分析中變

無法使用這筆資訊。舉例來說，在 2015 年的觀測資料中便有因測站搬移或儀器升級等因素而暫停觀測的測站出現，這會導致在向後延伸長期氣候分析資料時，能夠被使用之可回溯連續資料量的數量降低，進一步影響到對於極端降雨事件極值的分析能力。

本研究中所關心的兩大問題，氣候變遷下台灣地區颱風豪雨事件的變化與降雨機制，其時空特性便有所不同，我們在討論這兩個不同面向問題時所使用之研究的方法也不一樣。在極端降雨事件變化上，由於我們關心的是長期的趨勢，如果使用資料的時間太短，則一些長時間週期之變化現象就會因為資料時間長度不足而以趨勢的訊號呈現。換句話說，如果我們為了能使用高空間解析度之觀測資料，而僅選取近 20 年的資料進行分析，那我們先前所得到週期為 30 年以上的年代際振盪訊號，便無法由這樣的資料呈現，所以必須使用具有長期穩定的觀測資料。但同時，在使用這樣觀測資料的同時也會遭遇到另一個問題，那就是在天氣尺度上，這些資料點對於極端事件的代表性是否足夠？

此時我們可以藉由幾個面向來檢視這個問題，首先我們應該先瞭解不同空間解析度下，降雨資所呈現的機率密度函數(Probability density function, PDF)和累積密度函數(Cumulative density function, CDF)是否有一致的訊號。圖 A2 的(a)與(b)便是利用兩種不同資料所得到的 PDF 和 CDF，由圖中我們可以發現當使用的高空間解析度資料時，降雨強度較高的降雨事件發生的次數會增加，這與新增加的觀測位置多位於山區等地形效應較為顯著的區域有關。換言之，在低空間解析度的資料可能會因為資料的不均勻導致山區降雨強度的低估，同時也可能低估極端降雨事件發生的頻

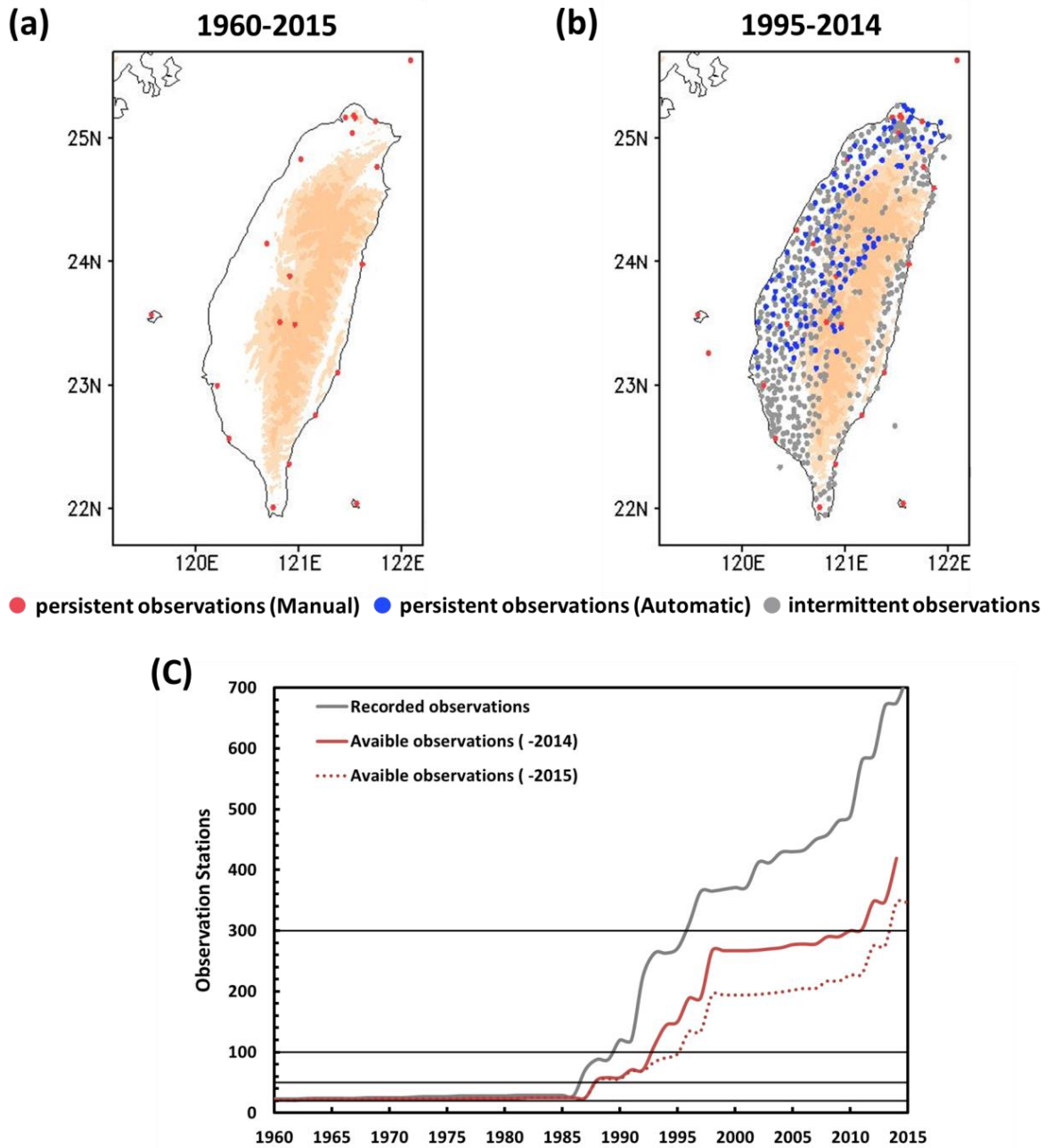


圖 A1 1960~2015 年台灣地區地面雨量測站之分布之變化。(a)1960~2015 間 56 年之連續觀測資料測站空間分佈；(b)1995~2014 間 20 年連續觀測資料之測站空間分佈；(c)可回溯連續觀記錄之時序列變化，灰線為記錄上曾經布建之測站數，紅色實線表示由 2014 年可回溯之連續觀測站數，紅色虛線表示由 2015 年可回溯之連續觀測站數。

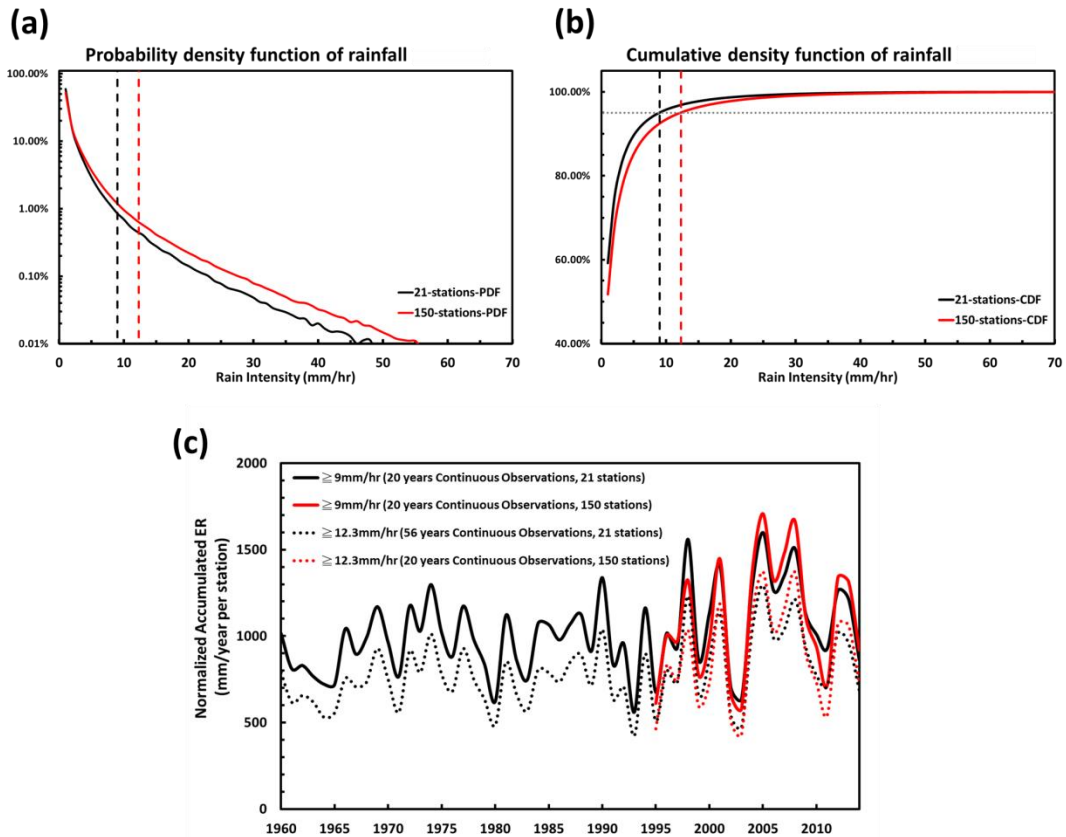


圖 A2 利用不同時空密度之測站資料所分析之台灣地區降雨(a)機率密度函數、(b)累積密度函數與(c)極端降雨量時間變化趨勢。圖中之黑色與紅色線條分別代表利用 21 個 56 年長期測站資料與較高空間密度之 20 年觀測資料的分析結果，(c)中的黑色與紅色虛線則表示依據 20 年較高空間密度測站資料所求得之前百分之五降雨強度為極端降雨標準的極端降雨量時序列變化。

率。但是極端降雨事件週期性變化與趨勢的分析中，使用不同空間解析度的資料卻能表現一致的特性。圖 A2(c)是我們利用兩種不同空間解析度的資料分別計算其 95 百分位的降雨強度（分別是 9mm/hr 與 12.3mm/hr）並圖依照此一極端降雨事件的定義分析極端降雨量的時間序列變化的結果。我們發現使用不同空間解析度之觀測資料，其變化的趨勢與特性皆相同，其相關係數都超過 0.95 以上，也就是說使用低空間解析度的觀測資料並不會影響我們對於極端降雨趨勢變化的分析，同時也因為擁有更為長期的資料記錄，能夠

進行年代際的變化的分析。而空間分布特性上，在 Su et al.(2012)的研究中以颱風 Morakot(2009) 為例，顯示使用 21 個氣象測站之資料確實會在山區造成降雨量的低估，且無法解析山區降雨分布的細節；但卻依然大範圍的降雨特性，正確的顯示颱風降雨集中於南台灣山區的空間特徵。換句話說，在極端降雨事件的氣候分析上，只要測站的空間分布特性能維持一定的均勻性，則資料記錄時間的長短對於氣候變化趨勢與週期振盪訊號的影響較為顯著，應是優先考量之因素。



由上述的分析可知，如果要進行長時間的氣候變遷分析時，便需要考量到研究目標的時空特性去選取恰當的研究資料與分析方法。針對降雨機制的研究方面，我們已經瞭解到台灣颱風豪雨事件其實是一多重尺度交互作用所導致的現象，故針對不同機制的時空尺度特性，我們也應該使用不同的方法處理。在討論大尺度系統對於颱風極端降雨的影響方面，由於考量的是如太平洋副高或是亞洲夏季季風的長時間週期的變化趨勢，故應使能涵蓋東亞季風區且具有長期資料之再分析資料。但是討論到颱風靠近台灣時運動特性的變化或中尺度對流尺度之問題時，我們便必須使用高解析度的數值模式模擬與高空間解析度

的雷達觀測資料進行相關機制的研究。氣象資料是在進行相關長期氣候變遷分析研究最重要的資訊，相較於全球大部分地區而言，我們十分幸運的擁有高品質且高密度的觀測資料。在國內中央氣象局與相關氣象單位的努力下，氣象觀測網的建置也漸趨完整。但是觀測資料的不可回溯的特性依舊是在相關研究上不可避免的限制，所以積極並小心的維護這些得來不易的長期氣象觀測記錄。只要能夠維持儀器觀測的連續性與穩定性，在可期待的未來，我們將有機會擁有更高空間解析度且品質穩定的長期連續觀測資料，相信會對台灣的極端天氣事件相關研究產生極大的幫助。

# The Mechanism of Taiwan Typhoon Extreme Rainfall Variation under Climate Change

Shih-Hao Su<sup>1</sup> Yu-Han Chen<sup>2</sup> Yi-Ting Yang<sup>3</sup>  
Li-Huan Hsu<sup>4</sup> Hung-Chi Kuo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Chinese Culture University, Taipei

<sup>2</sup> National Taiwan University, Taipei

<sup>3</sup> Technology Education Division, National Science and Technology Museum, Kaohsiung

<sup>4</sup> Taiwan Typhoon and Flood Research Institute, National Applied Research Laboratories, Taipei

(manuscript received 9 November 2017 ; in final form 12 March 2018)

## ABSTRACT

In this paper, we reviewed the previous studies of Taiwan extreme rainfall variations under climate change. The hourly precipitation data from 21 Central Weather Bureau surface stations during the past 56 years (1960-2015) and 91 westward typhoons are analyzed. The average precipitation rate was increased on past 30 years, and 10 of the top 15 rainfall cases occurred after 2004. The rain intensity was increasing about 15% for both pre-landing and overland periods; 34% for post-landfall period in last 30 years. The looping tracks extended the pre-landing duration of typhoons and caused more extreme typhoon rainfall. The precipitation during the overland period was related with the typhoon circulation and the terrain effect. This effect is resulted in topographic phase locked convections, which induce the asymmetric potential vorticity (PV) tendency, decelerate the typhoon translation speed, and make more changes for extreme rainfalls. The effects of typhoon duration time and the large-scale strength of southwesterly flow during the post-landfall period both increased the rainfall. It is also highly correlated with the Type-C track cases. The increasing trend of post-landfall typhoon extreme rainfall in past 30 years also reflected the variation of Type-C typhoon quantities. In addition to the increasing trend, both of extreme rainfall frequency and accumulated amount showed large inter-annual variations and a notable decadal variation. On the other hand, the signal of global warming may be superposed by the terrestrial effects and cannot be distinguished. Moreover, the spatial distribution of weather station networks may affect the observations of extreme rainfall. We analyzed the different data sets for 21 stations

(56-year continuous record) and 150 stations (20-year continuous record) to explicate the affection of spatial distribution. The underestimate of extreme rainfall amount in the mountain regions for low resolution weather station network is broadly in line with expectations, but the long-term increasing trend and periodic variation features are consistent. As long as the data to maintain uniformity of spatial distribution, the extreme rainfall trend and periodic oscillation characteristics will not be affected. In the other words, the length of weather station record should be the first priority factor for the climate analysis.

**Key Words: Typhoon extreme rainfall, Typhoon movements, Decadal oscillation, Southwesterly flow, Spatial distribution of weather station networks. doi: 10.3966/025400022017124504002**

