

## 台灣颱風降水統計分析

Large Increasing Trend of Tropical Cyclone Rainfall in Taiwan  
and the Roles of Terrain<sup>1</sup>

楊憶婷<sup>2</sup>

### 摘要

因台灣位於西北太平洋上，容易受到颱風的侵襲或影響，對於從事飛航相關人員而言，颱風降水會影響到跑道濕滑、能見度及雲幕，是一惡劣的天氣現象，在本研究中我們發現，過去52年侵台颱風中總降雨最多的前12名，其中有8個發生在2004年之後。最重要影響台灣的颱風降水因子，是颱風的移動速度，與颱風強度無關，颱風強降水雖然可能受到氣候變遷的影響，但是颱風環流和西南氣流的交互作用在颱風離開台灣陸地之前不顯著，而是台灣的地形可能扮演很重要的角色，離陸之後，降雨強度有明顯的趨勢變化，可能和西南氣流在氣候上的變化有關。

### 一、前言

許多觀測研究顯示，熱帶氣旋降水量及降水強度在許多不同的區域都有增加的趨勢(Kim et al. 2006; Lau et al. 2008; Lau and Zhou 2012)，而這可能與全球氣候變遷有關。模式模擬研究中也顯示，熱帶氣旋的強度和降水量可能受全球暖化的影響而增加(Knutson et al.

---

<sup>1</sup>本文相關成果已於2013年已「Large Increasing Trend of Tropical Cyclone Rainfall in Taiwan and the Roles of Terrain」為標題刊登於美國氣象學會Journal of Climate期刊。

<sup>2</sup>國立台灣大學數學研究中心

2010)。由於台灣的地理位置在西北太平洋副熱帶區域，時常受到颱風的侵襲或影響，我們發現自1960-2011年侵襲台灣的颱風中，造成台灣降水量前12名的颱風中，便有8個發生在2004年之後，其中帶來最大雨量紀錄的便是2009年的莫拉克颱風(如表1)，筆者也是在莫拉克風災之後開始進行這個研究，因莫拉克颱風造成台灣地區嚴重的經濟損失及人命傷亡，因此許多大氣科學家對於莫拉克颱風有許多相關的觀測及模擬的研究，例如：Ge et al. 2010; Lee et al. 2011; Chien and Kuo 2011; Hendricks et al. 2011。

台灣中央山脈許多高山高達3000公尺，呈南北走向並長達340公里，侵襲台灣的颱風多會受到其影響導致降水及結構改變(Chang et al. 1993; Ge et al. 2010)。Chang et al. (1993)曾提出台灣的降水分布，和颱風的中心與台灣之間的距離及位置有關係。雖然颱風降水分布是不對稱的，降水和中心距離、移動方向及路徑都有關係，但是台灣的地形對於颱風降水影響更大，因此前述的影響因子是屬於較為其次的。本研究將探討1960-2011年侵襲台灣的颱風其降水的統計特性，及年代際的降水特性變化。

## 二、資料及方法

我們研究資料包含1960-2011年共84個登陸台灣的颱風，共使用全台灣21個雨量站的平均時雨量紀錄(如圖1a)，21個雨量站均為人工測站並且沒有缺少觀測資料，其中台北測站曾在1992年搬遷並於1997年搬遷回原站，但是搬遷位置在同一條路並且相距小於100公尺，台南站和新竹站都有搬遷至較遠的位置，因此我們在本研究做了兩種測試，第1種是扣除此兩個測站，第2種是使用1977年之後的25個人工測站的颱風降雨量，並與本研究的21個測站颱風降雨量相比較，每個颱

風個案的降雨量都超過0.99的相關性，故我們使用本研究的21個測站進行接續的研究。

中央氣象局將颱風路徑一共分為9類，有鑑於本研究主要針對直接影響台灣且最常見的颱風路徑，我們研究的颱風為北(N，共26個個案)、中(C，共23個個案)及南(S，共14個個案)三種路徑，分別對應到中央氣象局歸類的路徑2、3和4，路徑分布如圖1b-d，另外有21個個案是屬於其他的6種路徑。我們利用European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) - Tropical Ocean and Global Atmosphere (TOGA) Global Advanced Analysis資料，選取3個代表N、C和S路徑的925 mb氣流線繪製於圖1e。

我們將每個颱風路徑進一步處理，當颱風中心進入距離台灣海岸線100公里的範圍內至登陸台灣，定義為登陸前時期(PR)，颱風中心登陸台灣至離開台灣陸地定義為登陸時時期(OL)，颱風中心離開陸地至距離台灣海岸線100公里範圍，我們定義為離陸時期(EX)。其中，颱風中心定位在1997年以前中央氣象局利用衛星、飛機觀測及雷達定位的再分析資料，1998年以後我們以中央氣象局提供颱風中心資料，並以其提供之衛星及雷達觀測定位資料為參考進行調整。並計算出這3個時期的21個測站總雨量及降雨強度進行後續分析。

### 三、颱風登陸前(PR)、登陸時(OL)、離陸後(EX)的降雨統計

圖2a為颱風登陸前的降雨量及影響時間的關係，其中N、C、S和All(所有的路徑共84個點)線性回歸線及方程式均標示在圖中。雖然在All的情形下各點都很零散( $R^2=0.31$ )，但是將路徑分類為N、C、S後， $R^2$ 分別為0.64、0.57和0.72，前述的相關性均通過t檢定的99%

顯著水準。主要在A11情形下的R2較低和分路徑後的R2較高的原因在表2，表2列出3種路徑的12小時降水強度分別為，N [1960 mm (12 h)<sup>-1</sup>]、C [1305 mm (12 h)<sup>-1</sup>] 和S [1033 mm (12 h)<sup>-1</sup>]，不同路徑的降水強度有明顯的差異。這結果顯示颱風的路徑會影響颱風的降水強度，圖1也顯示，台灣在颱風季時本受到東亞夏季季風的影響，這三種西行的颱風路徑的颱風環流和季風環流的西南水氣通量共伴，與地形間的交互作用可能產生更多降水及激發中尺度對流，但這樣的作用對於S路徑的颱風，共伴的氣流位置與地形相聚較遠，可能是PR時期S路徑降水強度較低的主要原因。

圖2b為颱風影響時間6、9、12小時及全部個案的R2，在12小時以內的個案N和C路徑的R2 = 0.47和0.49（顯著水準為99%），比S的R2 = 0.29（顯著水準為95%）和A11的R2 = 0.25（顯著水準為99%）要高，這個結果顯示PR時期，地形的作用在距離台灣海岸100公里以內，影響時間12小時以上才開始對降水有影響，但是這種影響對於S的路徑更要超過12小時。

在登陸時的階段(OL)，圖3a顯示6小時以內的個案影響時間及降水量分布都很集中，圖3b也顯示在陸地上的階段，颱風降水受地形影響很顯著，影響時間在6小時以內，颱風降水和影響時間的關係相關性仍高，配合表2中OL時期12小時的降水強度顯示，N [2132 mm (12 h)<sup>-1</sup>]最大，接著是C [1558 mm (12 h)<sup>-1</sup>]，最後是S [812 mm (12 h)<sup>-1</sup>]，且N和C路徑的12小時降水強度比S大2倍及以上。此外，OL時期的N和C路徑12小時降水強度都比PR時期要高，這也顯示即便颱風在登陸後，強度會因地形影響而減弱，在OL時期地形與氣流的交互作用最顯著，圖1e的氣流場也顯示在N和C路徑的颱風及季風環流交互作用最明

顯。而OL時期S路徑的12小時降水強度都比PR時期要低。圖3a也標示一造成嚴重災情的颱風-2001年納莉颱風，它在台灣陸地上共有51小時並且有6281.6 mm的累積雨量。主要原因是納莉為一特殊路徑颱風，移動路徑是從北台灣移至南台灣，路徑為南北走向，使其在台灣陸地影響時間長，造成破紀錄的累積雨量。

在離開陸地階段(EX)，地形效應比起PR及OL階段較不顯著，尤其在S路徑 $R^2=0.42$ (PR和OL時期為0.72和0.73)。主因是S路徑的地形影響本就在PR和OL時期最小，在離開陸地之後進入南海，地形影響的作用幾乎消失。比較表2中EX時期12小時的降水強度在N和S路徑減少最為明顯(分別比OL時期減少32%和30%)，C路徑則只有比OL時期減少6%，主因是C路徑的颱風離開陸地後，颱風中心位置仍在台灣海峽中間，颱風環流仍可受到台灣陸地影響。因此在C路徑的颱風，其降水統計特性受地形影響最大，仍有颱風環流及從南海來的西南氣流加強，與地形有交互作用產生降水。但是N路徑的颱風，有些會向西北方向前進，颱風環流與從南海來的西南氣流加強作用較弱(如圖1a)。

#### 四、Decadal 變化

由上節的結果顯示，颱風的降水量和路徑有關係，而近年的颱風降水增加可能來自兩個因子：(1) 颱風的移動速度變慢，導致颱風在台灣的影響時間變長；(2) 颱風的路徑變化，近年受地形影響的路徑個案變多(如C路徑)。例如：2009年莫拉克颱風便是C路徑，且移動速度慢而在台灣地區產生驚人的降雨量(Lee et al. 2011)。在表1中，8個強降雨量的颱風中，有7個其影響時間比84個颱風的平均影響時間(22小時)要長，且有7個是屬於N或C路徑(另1為氣象局分類的路徑6，台灣東側海岸由南向北走)。納莉颱風目前為第2高的降雨量，但它是

非常特殊的颱風，在陸地的影響時間便高達51小時，如扣除納莉颱風，21世紀的強降雨量颱風便有8個是發生在2004年，即表中的黑體字標示部分，因此我們進一步針對年際與十年際變化進行分析。

圖5為N、C和S路徑的颱風影響時間年際變化，2004年的分界線亦繪製於圖中以方便比較，另表3列出2004年前後侵台颱風的發生頻率及影響時間，一年如果超過1個颱風則以平均的影響時間來計算。對於降水強度最大的N路徑，雖然其發生頻率減少，但是其影響時間增加了51%(從15.9 hr增加為24 hr)，對於降水強度第二大的C路徑，颱風影響時間沒有顯著變化，但颱風發生的頻率變高，而降水強度最少的S路徑其發生頻率及影響時間都在減少，因此，整體來看台灣的颱風降水量及降水強度2004年之後在增加。

為了進一步探討上述變化可能的原因，我們將PR、OL和EX的降水強度的年際變化結果繪製如圖6。一年如有多個颱風則以平均降水強度來表示。圖6a為Category 1-3的颱風統計結果，圖6b則為全部的颱風統計結果。圖6顯示在PR和OL時期，因颱風在前後26年的平均降水強度變化不顯著，颱風的降水強度雖然有年際及十年際的變化，但是沒有52年的變化趨勢(圖6a中PR和OL的平均降水強度分別從112.5 mm hr<sup>-1</sup>變為110.1 mm hr<sup>-1</sup>及128.7 mm hr<sup>-1</sup>變為129 mm hr<sup>-1</sup>；圖6b中PR和OL的平均降水強度分別從112.2 mm hr<sup>-1</sup>變為112.1 mm hr<sup>-1</sup>及128.8 mm hr<sup>-1</sup>變為130.4 mm hr<sup>-1</sup>)。但是在EX時期，降水強度在前後26年有明顯的增加，只針對Category 1-3的颱風，降水強度從78.2 mm hr<sup>-1</sup>增加至92.9 mm hr<sup>-1</sup>(增加19%)，針對全部的颱風則水強度從75.9 mm hr<sup>-1</sup>增加至92 mm hr<sup>-1</sup>(增加21%)，雖然顯著水準因年際及十年際的變化，故低於95%，但是仍是值得注意的現象。

以上的討論亦顯示，台灣地區的颱風降水強度在PR和OL時期，因為環流與地形間的交互作用效應比氣候變遷更為顯著，但是在離開陸地階段，颱風降水強度後26年在增加，台灣西南側的降水與西南氣流帶來的水氣通量有關，潮濕的西南季風可能為台灣地區帶來豐沛的降水及強降水強度(Johnson 2006)，這樣的西南水氣通量如有氣候變化，可能會影響到颱風的降水強度，例如：2009年莫拉克颱風在影響台灣的期間，也與西南氣流交互作用帶來破紀錄的雨量(Wu et al. 2011; Chien and Kuo 2011)。在EX時期，颱風環流與西南氣流距離較近，兩氣流加強的機會增加，且地形作用也較不顯著，可能受到氣候變遷的影響，造成後26年EX時期降水強度增加的主要原因。但是這樣的變化不會影響到颱風強度，因次在圖6中，即便把強颱風(Category 4-5)扣除，也能得到相似的結果。

## 五、討論

以上我們分析颱風的降水統計，發現以下的結果：

- (1) 過去52年侵台颱風中總降雨最多的前12名，其中有8個發生在2004年之後，顯示颱風降雨明顯的年代際變化。
- (2) 颱風降水量與颱風的影響時間(或是移行速度)有關，颱風移行速度越慢，影響時間越長，降水量變越大。
- (3) 對於降水強度最大的N路徑，其發生頻率減少，但是其影響時間增加了51%，對於降水強度第二大的C路徑，颱風影響時間沒有顯著變化，但颱風發生的頻率變高，而降水強度最少的S路徑其發生頻率及影響時間都在減少，因此，整體來看台灣的颱風降水量及降水強度2004年之後在增加。

(4) 在登陸前和登陸時，颱風的降水強度雖然有年際及十年際的變化，但是沒有52年的變化趨勢，但是離陸後有明顯的52年的變化趨勢，因此階段受地形影響作用不顯著，因此可能和西南氣流在氣候上的變化有關。

對於從事飛航相關人員，未來面臨移行速度慢的颱風，在飛安操作上要特別注意降水量可能會較大，因為影響時間也會較長，伴隨的惡劣能見度及低雲幕等天氣現象應該也會影響較為顯著，提供給對飛航天氣有興趣人員做為參考。

### 參考文獻

- Chang, C.-P., T.C. Yeh, and J.M. Chen, 1993: Effects of terrain on the surface structure of typhoons over Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 734-752.
- Chien, F.-C., and H.-C. Kuo, 2011: On the extreme rainfall of Typhoon Morakot (2009). *J. Geophys. Res.*, **116**, D05104.
- Ge, X., T.Li, S. Zhang, and M. S. Peng, 2010: What causes the extremely heavy rainfall in Taiwan during Typhoon Morakot (2009)? *Atmosph. Sci. Lett.*, **11**: 46–50.
- Hendricks, E. A., J. R. Moskaitis, Y. Jin, R. H. Hodur, J. D. Doyle, and M. S. Peng, 2011: Prediction and diagnosis of Typhoon Morakot (2009) using the Naval Research Laboratory's mesoscale tropical cyclone model. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **22**, DOI code: 10.3319/TAO.2011.05.30.01.
- Johnson, R. H., 2006: Mesoscale processes. Chap 8, *The Asian Monsoon*, B. Wang, Ed., Praxis-Publishing Ltd., 331-779.
- Kim, J.-H., C.-H. Ho, M.-H. Lee, J.-H. Jeong, and D. Chen, 2006: Large increase in heavy rainfall associated with tropical cyclone landfalls in Korea after the late 1970s. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L18706.



- Knutson, T. R., et al., 2010: Tropical cyclones and climate change. *Nature Geoscience* **3**, 157 – 163.
- Lau, K.-M., Y. P. Zhou, and H.-T. Wu, 2008: Have tropical cyclones been feeding more extreme rainfall? *J. Geophys. Res.*, **113**, D23113.
- Lau, W. K. M., and Y. P. Zhou, 2012: Observed recent trends in tropical cyclone rainfall over the North Atlantic and the North Pacific. *J. Geophys. Res.* **117**, D03104, 13 pp.
- 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(3)**, 213-222.

表 1: 1960-2011 年颱風在登陸前 100 公里 (PR)、登陸時 (OL)、離陸後 100 公里 (EX) 降水總量超過 3500 mm 的颱風排名。其中颱風在各階段的影響時間和氣象局路徑分類也標示於表中。粗體字表示 2004 年之後的個案，一共有 8 個。

Rank	Year	Typhoon Name	PR	OL	EX	Total (h)	Rainfall (mm)	Track type
<b>1</b>	<b>2009</b>	<b>Morakot</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>18</b>	<b>45</b>	<b>8996</b>	<b>CWB 3 (C)</b>
2	2001	Nari	10	51	14	75	8108	CWB Special
<b>3</b>	<b>2008</b>	<b>Sinlaku</b>	<b>16</b>	<b>10</b>	<b>22</b>	<b>48</b>	<b>8105</b>	<b>CWB 2 (N)</b>
<b>4</b>	<b>2005</b>	<b>Haitang</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>32</b>	<b>5589</b>	<b>CWB 3 (C)</b>
5	1996	Herb	5	7	4	16	4836	CWB 2 (N)
6	1989	Sarah	5	20	13	38	4655	CWB 3 (C)
7	1960	Shirley	3	11	10	24	4637	CWB 2 (N)
<b>8</b>	<b>2007</b>	<b>Krosa</b>	<b>12</b>	<b>1</b>	<b>10</b>	<b>23</b>	<b>3936</b>	<b>CWB 2 (N)</b>
<b>9</b>	<b>2004</b>	<b>Mindulle</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>7</b>	<b>41</b>	<b>3856</b>	<b>CWB 6</b>
<b>10</b>	<b>2008</b>	<b>Jangmi</b>	<b>4</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>25</b>	<b>3800</b>	<b>CWB 2 (N)</b>
<b>11</b>	<b>2008</b>	<b>Kalmaegi</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>23</b>	<b>3763</b>	<b>CWB 2 (N)</b>
<b>12</b>	<b>2005</b>	<b>Talim</b>	<b>4</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>17</b>	<b>3526</b>	<b>CWB 3 (C)</b>

表 2: 颱風在登陸前 100 公里 (PR)、登陸時 (OL)、離陸後 100 公里 (EX)期間，北(N)、中(C)和南(S)三種路徑的 12 小時累積雨量(mm)。

Phase	PR	OL	EX
Track Type			
N	1960	2132	1458
C	1305	1558	1467
S	1033	812	572

表 3: 2004 年前後，北(N)、中(C)和南(S)三種路徑颱風數目及影響時間。

Frequency	1960-2003	2004-2011
N	21(44.6%)	5(31.3%)
C	15(31.9%)	8(50.0%)
S	11(23.4%)	3(18.8%)

Duration (hour)	1960-2003	2004-2011
N	15.9	24.0
C	23.9	23.3
S	21.7	20.0

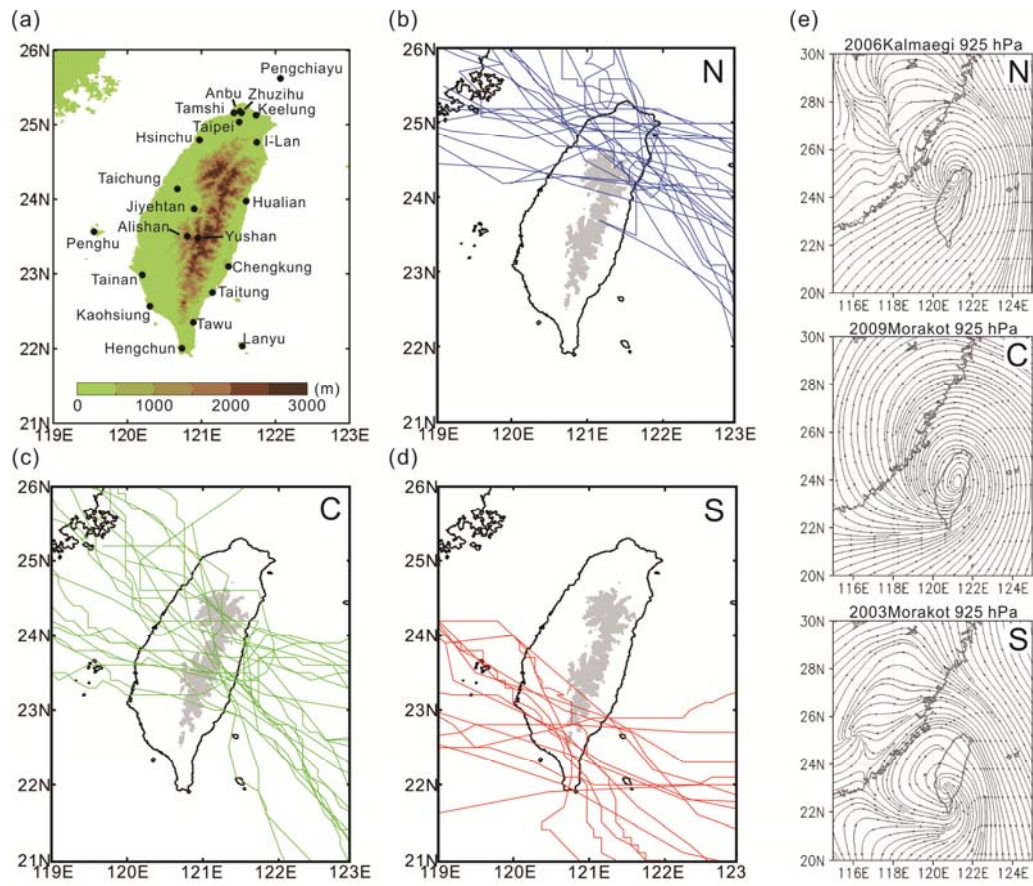


圖 1: (a)本研究使用的 21 個人工測站位置。(b)-(d)分別為 N、C 和 S 颱風路徑，(e)為 3 種路徑 925 mb 氣流線分布例子。

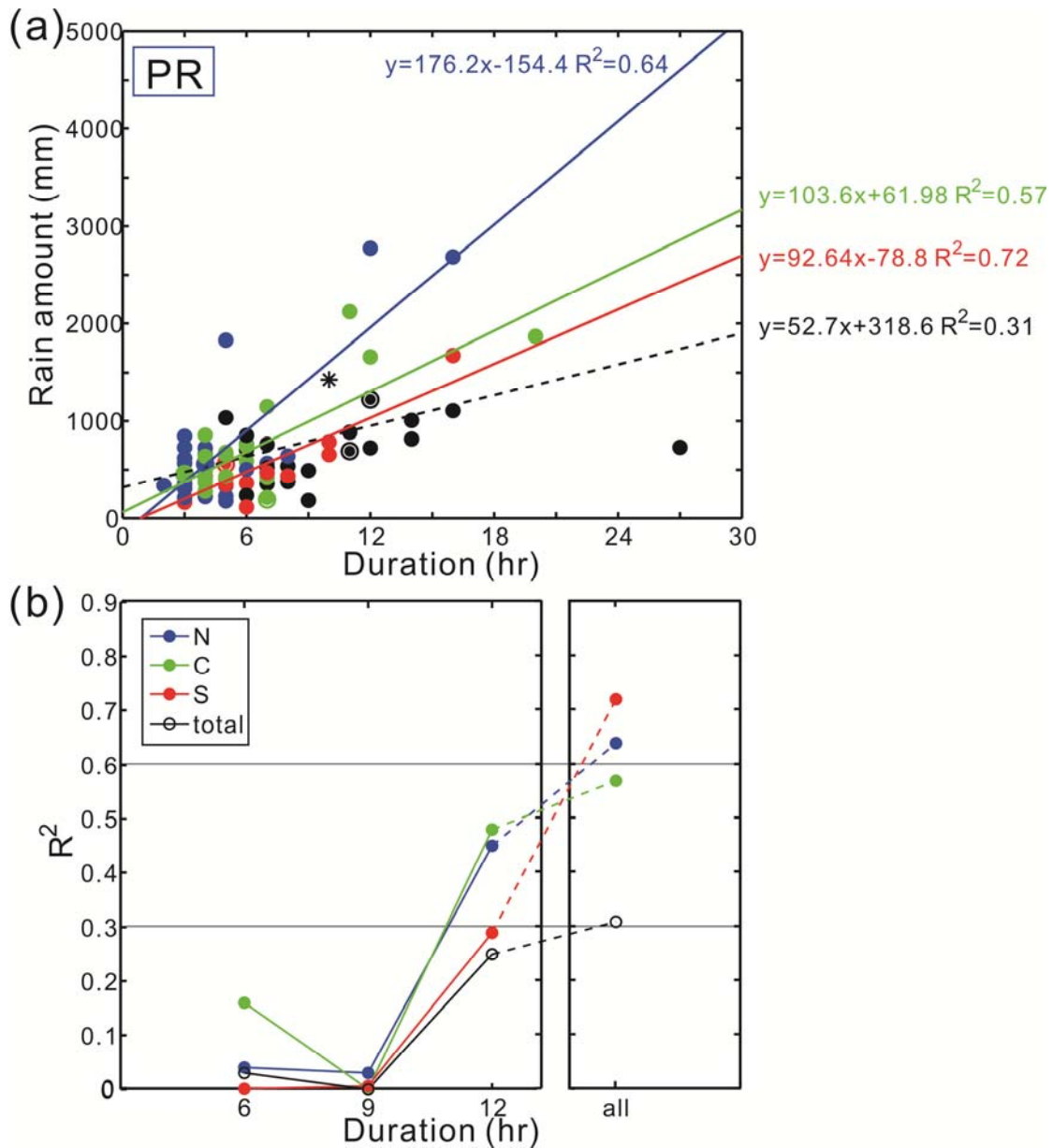


圖 2: (a) PR 時期，颱風總降水量和影響時間的關係，藍、綠和紅分別表示 N、C 和 S 的路徑個案，黑點表示其他路徑，點和圈重疊表示有兩個同值的個案，星點表示 2001 年納莉颱風。線性回歸線、方程式和  $R^2$  均標示在圖中。(b) 影響時間為 6、9、12 小時以內和全部的個案的  $R^2$ 。

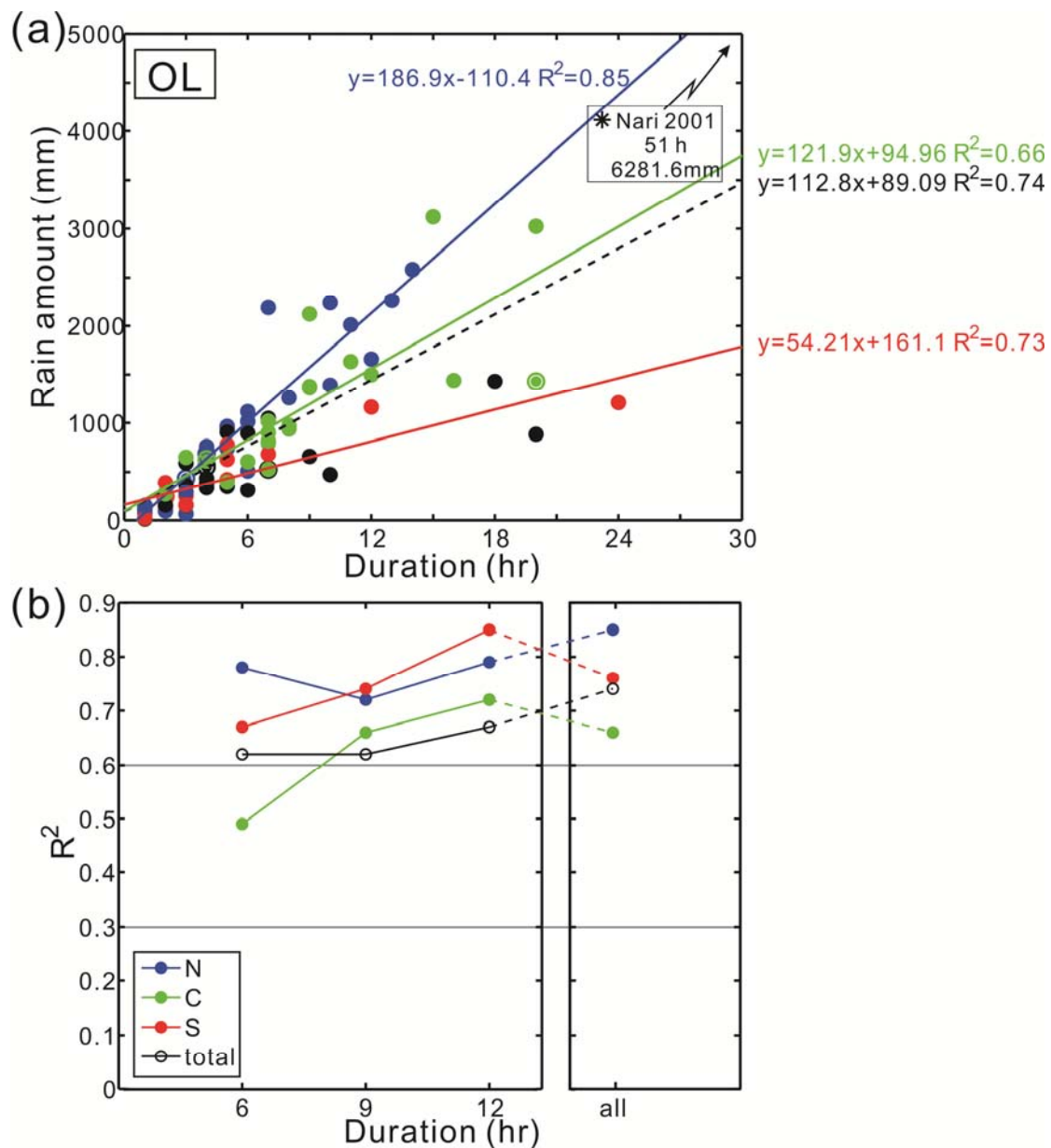


圖 3:同圖 2，但為 OL 時期。

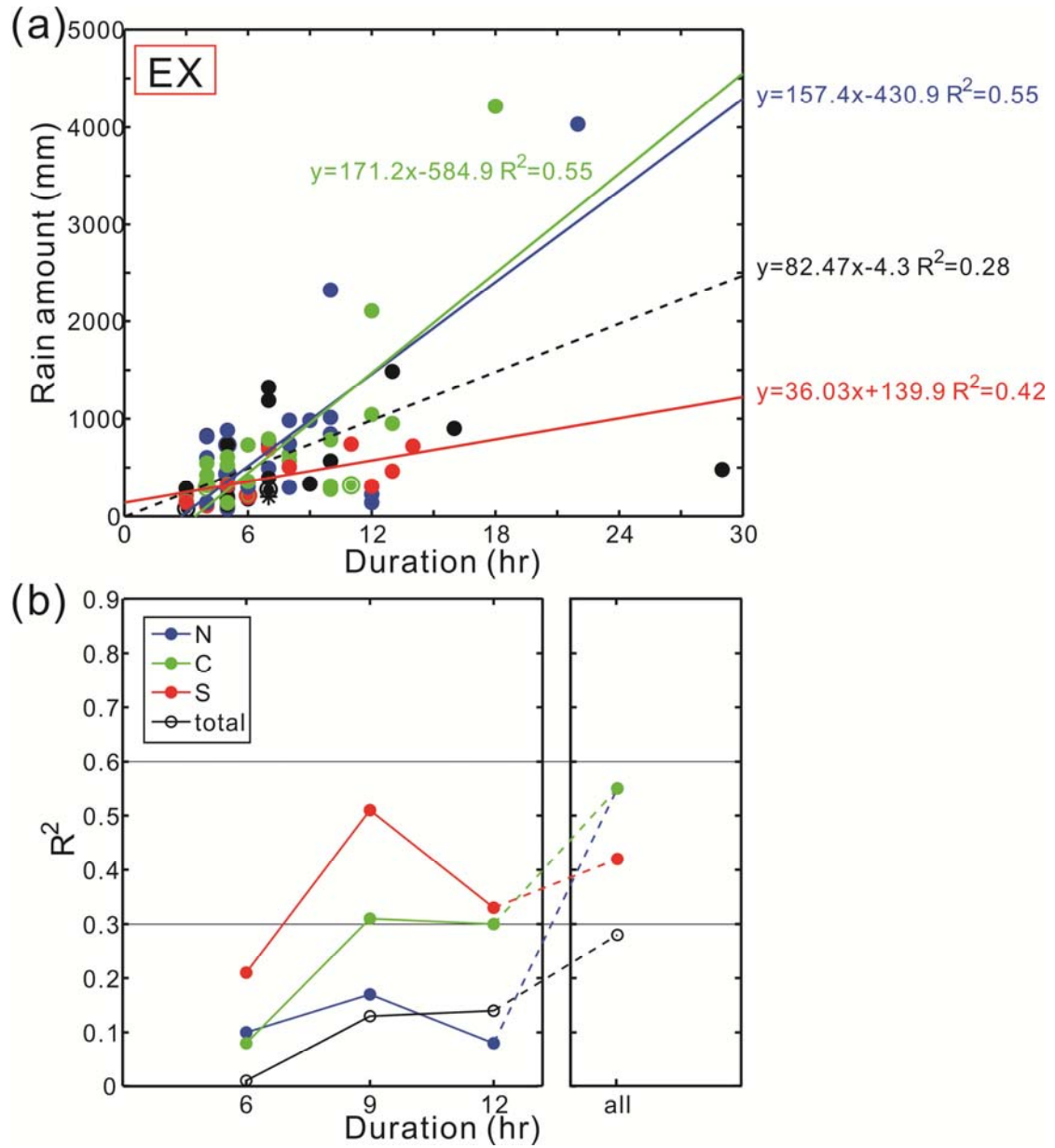


圖 4: 同圖 2，但為 EX 時期。

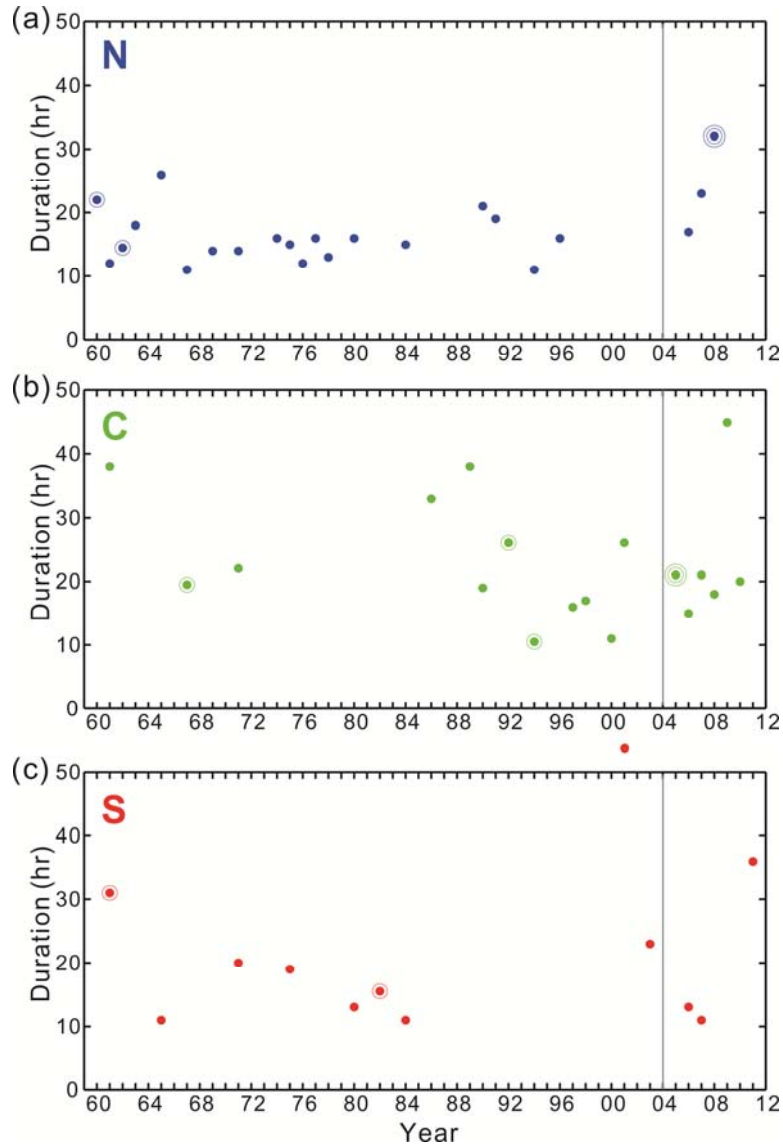


圖 5: 1960-2011 年間，N、C 和 S 的路徑颱風平均影響時間年際變化。點外有 1 圈表示 2 個颱風平均，點外有 2 圈表示有 3 個颱風平均。



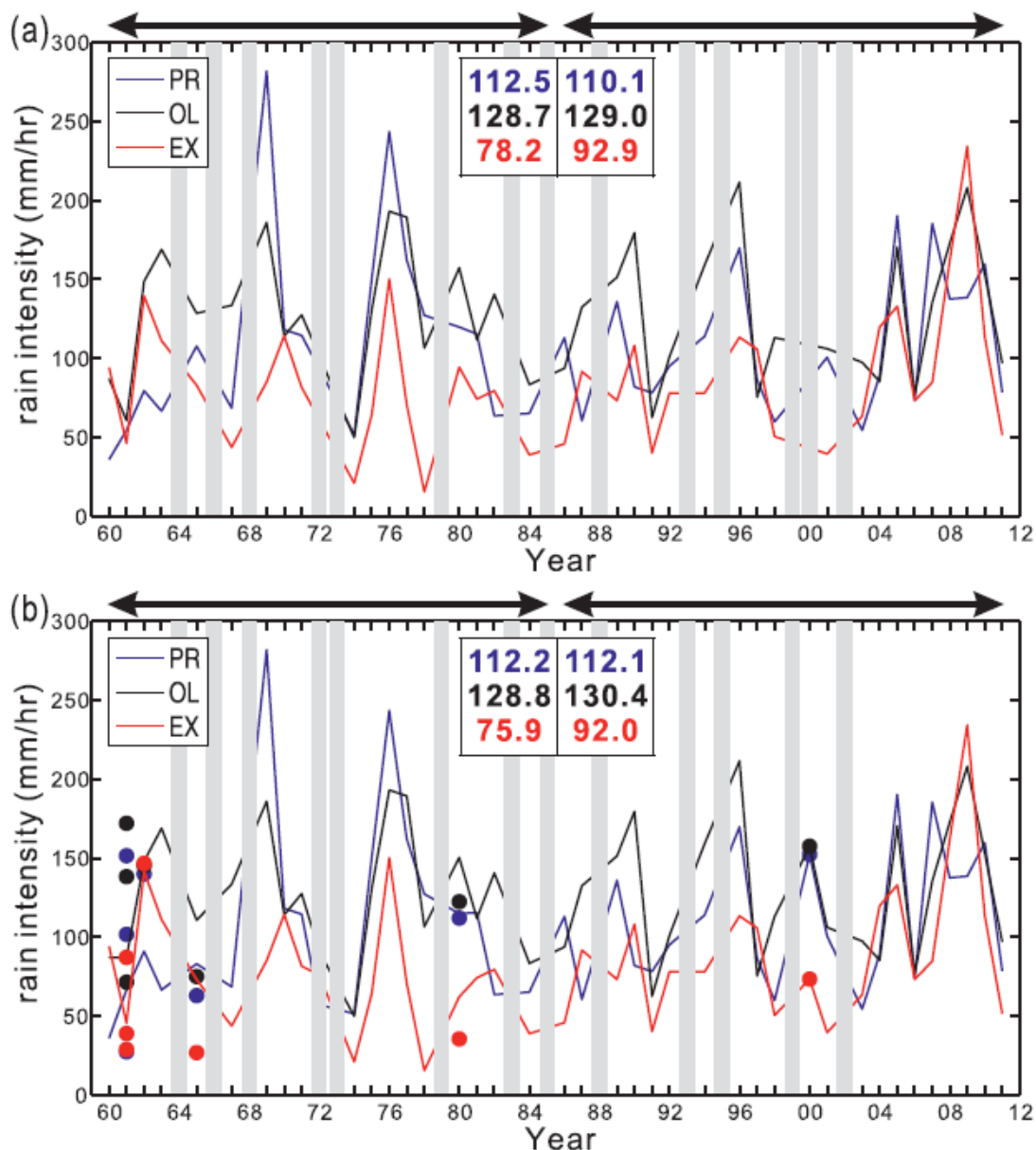


圖 6: (a) Category 1-3 侵台颱風在 1960-2011 年間颱風降水強度的年際變化，藍、黑和紅分別表示 PR、OL 和 EX 時期。灰色長條表示當年沒有侵台颱風。圖中的表表示 1960-1985 年及 1986-2011 年期間平均降水強度。(b)和(a)相同，但為全部颱風。