

適合西北太平洋海域之颱風生成潛在指數

蕭立朋¹ 余嘉裕^{2*}

¹ 中國文化大學地學研究所

² 國立中央大氣科學學系

(中華民國一〇六年九月二十二日收稿；中華民國一〇六年十二月八日定稿)

摘 要

本研究以早期美國學者依曼紐-諾藍(Emanuel and Nolan 2004)提出之颱風生成潛在指數(Genesis Potential Index, GPI)及後續依曼紐以濕熵差取代相對濕度之改進版本 χ GPI 指數(Emanuel 2010)為基礎，提出一個更適合推估西北太平洋海域颱風活動變化趨勢之 χ MqGPI 指數。我們利用美國國家海洋大氣管理局提供之颱風最佳路徑資料以及歐洲中期天氣預報中心之大氣海洋再分析資料，詳細診斷分析 χ MqGPI 指數優於 GPI 和 χ GPI 指數之原因。

關鍵字：西北太平洋、颱風活動、生成潛在指數

一、前言

近年來全球暖化所造成的氣候變遷是大氣科學界熱門的研究議題，根據政府間氣候變遷小組(Intergovernmental Panel on Climate Change)的第五次評估報告(5th Assessment Report)，與歷史紀錄相比 21 世紀是最溫暖的時期，增加的溫度也是最

明顯的；全球暖化已經是無法忽視的事實，隨之而來的極端事件也將會越來越頻繁。在各種極端天氣事件中，熱帶氣旋是最具破壞力的，對經濟、生命都造成巨大的破壞(Graumann et al. 2005; Chien and Kuo 2011)，因此預測熱帶氣旋活動的長期變化一直是氣象學家想突破的科學議題。目前颱風的研究多著重在個別颱風的路徑及地形的交互作

*通訊作者地址：余嘉裕，國立中央大學大氣科學學系(E-mail: jiayuh@atm.ncu.edu.tw)

用上，但就防災準備而言，颱風和氣候關係的研究有機會提供早期預警及準備，因此增進對颱風活動和氣候變化關係的了解是非常重要的。然而熱帶氣旋在熱帶海洋上形成，範圍僅數百公里，屬於天氣時間尺度現象，其空間尺度難以於氣候模式中解析，加上其活動和發展大都處於洋面上，觀測資料極為缺乏，使得推估颱風活動長期變化變得非常困難。直到現代化的氣象衛星加入觀測後，氣象學家才能獲得較完整的颱風活動資訊。

目前推估颱風活動長期變化趨勢主要有兩種方式：第一種方式是動力學法，將觀測數據輸入高解析度氣候模式中，明確地模擬出近似熱帶氣旋的渦旋發生頻率(Bengtsson et al. 1995; Bessafi and Wheeler 2006; Vitart et al. 2009)。目前動力學法雖然已有相當能力模擬出合理的熱帶氣旋發生頻率和年際變化(Vitart et al. 1997; Camargo et al. 2005; Belanger et al. 2010; Gall et al. 2011; Murakami et al. 2012)，但其過程涉及龐大計算機運算量，往往需要高速電腦才能執行，只有少部分氣象中心才配備有這類超級電腦。第二種方式為經驗法或統計法，藉由分析大尺度環境場與熱帶氣旋關係，發展出一個能預測颱風生成頻率的經驗式。基於熱帶氣旋的生成、路徑及強度等與大尺度環境場息息相關，且由於氣候模式中掌握大尺度環境場變化的能力較好，因此經驗法目前仍廣泛被應用在推估全球暖化下全球各海域颱風活動可能變化趨勢上(Emanuel 2013)。

研究颱風和氣候關係需要決定如何定量描述颱風活動，目前最常使用「生成數」(Number of Tropical Cyclone, NTC)，其優點為單純且明確，而對於颱風盛行路徑來說，颱風生成數即代表颱風季活躍程度，並藉由分析強弱個數或比例即可獲得颱風發展上的變化。美國學者 Gray (1979)是最

早歸納出熱帶氣旋活動和環境場間關係，並提出可以合理預測颱風季節活躍度經驗指數的第一人。Emanuel and Nolan (2004)依據 Gray (1979)歸納熱帶氣旋的活動指出颱風氣候和環境場間之關係，發展出熱帶氣旋生成潛在指數 Genesis Potential Index (GPI)，該指數近年來在氣候學界得到廣泛的運用。雖然 GPI 指數能夠反映熱帶氣旋空間分佈和季節循環等特徵，但在多數海域，GPI 模擬的熱帶氣旋潛生成數仍較觀測偏多(Camargo et al. 2007)。隨後，Emanuel (2010)針對上述缺點進行改良，並提出修正版 GPI 指數（本文稱之為 χ GPI）。最近 Yu et al. (2017)研究發現，前述 GPI 和 χ GPI 指數在西北太平洋海域表現都相當不理想，主要原因是它們都無法掌握西北太平洋海域特有的十年際氣候變異(Decadal Climate Variability)特徵所致。

影響颱風季節活動因素可由不同時空尺度氣候變化現象所控制，包括季內、年際、十年際振盪、全球暖化等(Krishnamurti 1985; Chen and Chen 1995; Camargo and Zebiak 2002; Hsu et al. 2008)。例如：Chan (2000)分析 1959~1997 年間西北太平洋颱風活動，指出在聖嬰成熟前一年 9、10 月時，南海地區的颱風活動有增加趨勢；此外，在聖嬰成熟當年的 9~11 月，南海颱風的活動有減少趨勢。由於太平洋地區是季內、年際、十年際振盪主要的活動中心，因此一個理想的熱帶氣旋潛在生成指數必須要有能力反應上述不同時間尺度氣候現象對颱風活動影響。

本研究採用歐洲中期天氣預報中心之全球大氣海洋再分析資料，針對 GPI 和 χ GPI 指數缺失，提出一個適合西北太平洋海域特殊氣候條件之新版本颱風潛在生成指數（本文稱之為 χ MqGPI），透過詳細診斷分析比較三種指數在西北太平洋海

域表現差異，並解釋及其背後原因。本文第二節介紹研究所需要的資料及三種熱帶氣旋潛在指數。第三節比較觀測颱風活動之季節與年際變化特徵，並與三種指數推估結果進行比較。第四節利用對數分解法(logarithmic decomposition)討論各指數分項特徵，以釐清三種指數表現好或不好之可能因素。第五節總結本研究的主要發現，並討論新的 χ MqGPI 指數可能之應用方向。

二、研究資料與方法

2.1 研究資料

本研究採用美國國家海洋和大氣管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)所提供的 IBTrACS (international best track archive for climate stewardship)颱風最佳路徑資料的 V3R7 版本，資料時間從 1848 年至 2014 年，包含了全球的熱帶氣旋共 7156 筆的生命時間、位置、以及最大風速，時間解析度為每 6 小時。為了討論颱風與大氣條件之間的關係，本研究在大氣資料方面，我們使用最新的歐洲中期天氣預報中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)全球大氣再分析場資料 ERA-interim 做為現在氣候的背景；資料垂直分層由 1000mb 到 1mb，共 37 層，空間解析度為 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ ，資料時間從 1979 年至 2014 年，共 36 年。

2.2 颱風生成指數

本文以颱風生成數(NTC)用來統計颱風活動的程度，其優點為單純且明確，而對於颱風盛行路徑來說，颱風生成數即代表颱風活動，並藉由分析強弱個數或比例即可獲得颱風季節活動上的變化。我們使用 IBTrACS 颱風最佳路徑資料，定義每六小時一筆的資料當熱帶氣旋最風速大於

35 knots 時，該熱帶氣旋位置即為颱風生成時間，並做為一筆颱風生成個數資料，統計颱風活躍時期 6 月至 11 月，由 1979 年至 2014 年所有通過檢定的熱帶氣旋，做為觀測颱風生成個數資料。

1. GPI 指數

除了直接分析颱風資料，透過環境場來推估颱風活動也是常用的方法。Bister and Emanuel (2002)量化颱風的強度潛勢 (Potential Intensity, 簡稱 PI) 計算方法為：

$$V_m^2 = \frac{T_s}{T_o} \frac{C_k}{C_D} [CAPE^* - CAPE]_m \quad (1a)$$

$$c_p T_s \ln \frac{p_o}{p_m} = \frac{1}{2} V_m^2 + CAPE|_m \quad (1b)$$

兩式疊代以求得熱帶氣旋可能發展的最大風速 V_m 以及最低氣壓 P_m ，式中 T_s 為海面溫度， T_o 為中性穩定層的外流溫度， C_k 及 C_D 分別為焔傳送及拖曳係數， $CAPE^*$ 是海平面高度飽和氣塊可用位能， $CAPE$ 則是邊界層環境大氣可用位能， P_o 則是環境氣壓(Emanuel and Nolan 2004)以此為基礎，進一步配合其他環境變數，定義颱風潛在生成指數(Genesis Potential Index, GPI)為：

$$GPI = |10^5 \eta|^{\frac{3}{2}} \left(\frac{H}{50} \right)^3 \left(\frac{V_{pot}}{70} \right)^3 (1 + 0.1 V_{shear})^{-2} \quad (2)$$

其中 η 是 850hPa 絕對渦度， H 為 700hPa 相對溼度， V_{port} 是颱風強度潛勢(PI)， V_{shear} 為 850hPa 和 200hPa 垂直風切值。

2. χ GPI 指數

Emanuel(2010)修正早期 GPI 指數，以濕熵差(moist entropy deficit)取代相對濕度，定義一個新的颱風生成潛在指數(本研究中稱為 χ GPI 指數)，其公式如下：

$$\chi_{\text{GPI}} = |\eta|^3 \chi^{-4/3} \text{MAX} \left((V_{\text{pot}} - 35 \text{ms}^{-1}), 0 \right)^2 (25 \text{ms}^{-1} + V_{\text{shear}})^{-4} \quad (3)$$

式中 η 為 850hPa 的絕對渦度， χ 為中對流層的濕熵差， V_{pot} 為熱帶氣旋潛在強度， V_{shear} 為 850hPa 和 250hPa 之間的垂直風切值。與(2)式比較，除了重新調整各個環境參數的權重之外，水氣的供給項也由相對濕度項替換成另一個新的參數濕熵差 χ 。參數 χ 為 Emanuel (1995) 所提出，其定義如下：

$$\chi = \frac{S_b - S_m}{S_o^* - S_b} \quad (4)$$

S_b 為邊界層的熵， S_m 為中對流層(600hPa)的熵， S_o^* 為海表面的飽和熵。

3. χ_{MqGPI} 指數

Yu and Neelin (1997) 以及 Yu et al. (1998) 基於 Betts-Miller 的濕對流調節參數化法，以對流準平衡(convective quasi-equilibrium)概念所提出另一種熱帶大氣穩定度和可降水量的估計方法，它是以考慮熱帶海洋上對流水氣對穩定度的影響，以濕靜能作為依據計算出以能量密度為單位的粗濕穩定度(gross moist stability, M)和粗水氣凝結度(gross moisture condensation, M_q)；前者量度包括水氣效應在內的淨大氣穩定度，後者可視大尺度輻合條件下大氣的可降水量。就颱風強度的估計而言， M_q 與計算 V_{pot} 的對流可用位能原理相近，可視為靜力平衡版的對流可用位能，用於取代 V_{pot} 作為新版颱風生成潛在指數的依據。

M_q 是以對流準平衡條件下的最大降水量來計算潛熱釋放所產生的能量，若全部轉化成動能亦可視為熱帶氣旋所發展達到的最大強度。 M_q 的定義如下(Yu et al. 1998)：

$$M_q(x, y) = \Delta p^{-1} \int_{p_t}^{p_0} (\partial_p \bar{q}) \Omega(p) dp \quad (5)$$

其中

$$\Omega(p, x, y) = - \int_p^{p_0} A^+(p') - \hat{A}^+ dp' \quad (6a)$$

$$A^+(p, x, y) = \int_p^{p_0} A(p', x, y) d \ln p' \quad (6b)$$

$\hat{\Omega}$ 為以氣壓為座標的垂直平均：

$$\hat{\Omega} = \Delta p^{-1} \int_{p_t}^{p_0} (\quad) dp \quad (6c)$$

Δp 是地面(p_0)到雲頂(p_t)的氣壓差。方程式中 A 是對流準平衡條件下溫度的垂直結構，與邊界層頂的氣溫及濕度有關， A^+ 則是基於 A 剖面得到的垂直氣壓梯度垂直分布，據此得到由地面到該層(p)氣壓梯度力所作的功 Ω ，亦即該層對流的能力，配合垂直混和比梯度就能得到從地面到對流層頂潛在可用水汽量，也就是 M_q 值。

我們以 Emanuel (2010) 所提出之新颱風生成指數 χ_{GPI} 做為基礎，將其中的 V_{pot} 替換成 M_q ，並提出新的修正版本，我們稱之 χ_{MqGPI} 指數：

$$\chi_{\text{MqGPI}} = |\eta|^3 \chi^{-4/3} \sqrt{M_q} (25 \text{ms}^{-1} + V_{\text{shear}})^{-4} \quad (7)$$

三、季節與年際變化

全球颱風生成地區主要分佈於太平洋、印度洋與大西洋，但經由我們分析後發現西北太平洋所擁有的觀測資料較多，而且觀測時間較長，因此本研究著重於西北太平洋，所選取的經緯度範圍為 110°E-180°，0°-40°N。

首先我們從熱帶氣旋個數氣候統計上來討論(圖 1)，從季節變化特徵來看三種颱風生成潛在指數的表現。圖 1a、1b 和 1c 是 GPI 指數、 χ_{GPI}

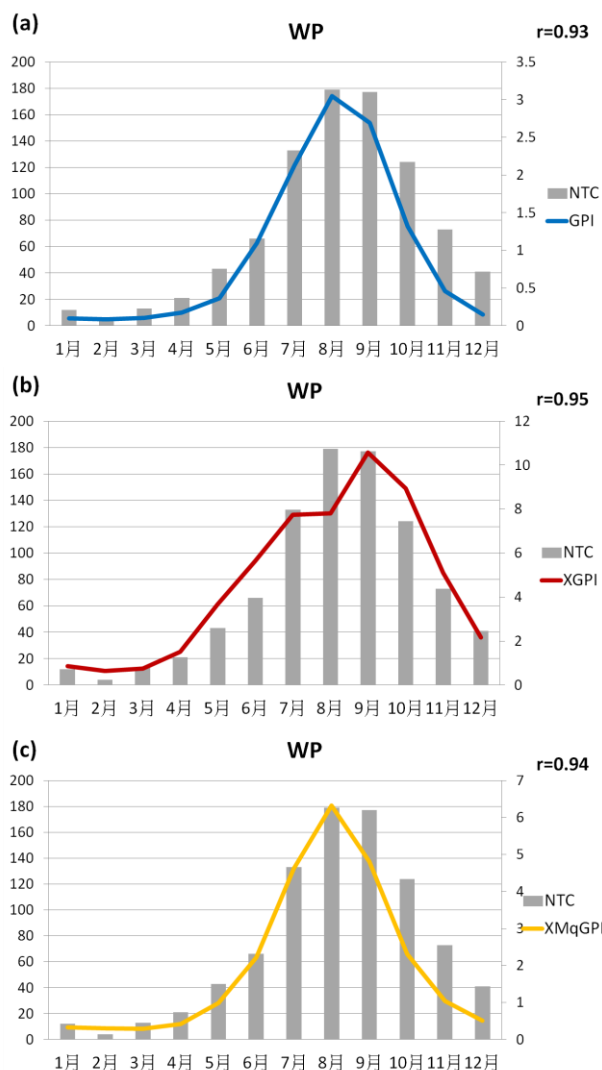


圖 1 西北太平洋 1979 年至 2014 年間，經時間空間平均後，颱風個數（NTC，對應左邊橫軸）與颱風生成潛在指數（對應右邊橫軸）之季節變化：(a) GPI 指數、(b) χ GPI 指數、(c) χ MqGPI 指數。

指數及 χ MqGPI 指數在西北太平洋的季節變化，我們可以從統計上發現颱風生成數從 1 月開始逐漸增加至 8、9 月生成數達到最高，之後則開始遞減至 12 月，而三個 GPI 指數變化的趨勢與統計結果大致上相當一致（相關係數皆大於 0.9 以上）。但 GPI 和 χ MqGPI 指數在 1 至 8 月表現較好，9 月開始兩指數呈現明顯低估； χ GPI 指數則是在 8 月有低估的情形，但 9 月之後的變化則與實際統計結果相當一致。

從年際變化特徵來看三種颱風生成潛在指數的表現，GPI 和 χ GPI 指數的年際變化如圖 2a 和 2b，從相關係數來看兩者都呈現負相關，精確的來說兩個指數與實際觀測結果呈現近乎為 0 相關。反之， χ MqGPI 指數則有明顯的正相關，相關係數可達 0.51，（如圖 2c），顯示 χ MqGPI 指數已相當程度能真實反應西北太平洋地區颱風活動年際時間尺度以上的變化特徵。如果單看 1979 年至 1997 年間 NTC 與颱風潛在生成指數的關係，在

表 1 西北太平洋 1979 年至 2014 年颱風盛行季，三種颱風生成潛在指數(GPI, χ GPI, χ MqGPI)與觀測颱風活動在季節變化和年際變化之相關係數。

NTC	Annual Cycle	Interannual Variability
GPI	0.93	-0.1
χ GPI	0.95	-0.09
χ MqGPI	0.94	0.51

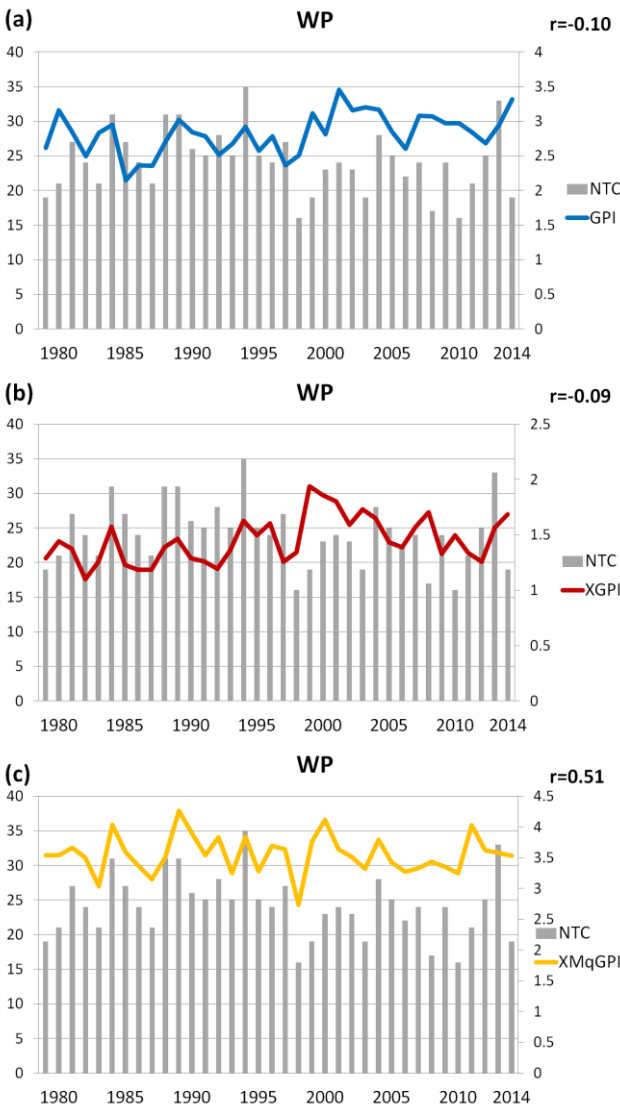


圖 2 西北太平洋 1979 年至 2014 年間，經時間空間平均後，NTC（對應左邊橫軸）與熱帶氣旋生成潛在指數（對應右邊橫軸）之年際變化時間序列：(a) GPI 指數、(b) χ GPI 指數、(c) χ MqGPI 指數。NTC 和三個 GPI 指數間之相關係數(r)呈現在各圖之右上角。

西北太平洋海域三個颱風生成潛在指數與觀測比較都呈現正相關，其中 χ MqGPI 指數的相關係數更可達 0.65（見圖 3）。

整體而言，我們發現雖然在季節變化上，GPI、 χ GPI χ 和 MqGPI 指數對於颱風活動都能準確掌握，但從年際變化特徵來看，僅有 χ MqGPI

指數的表現還算合格（相關係數 > 0.5 ）。其中 GPI 或 χ GPI 指數的變化在 1997 年之前和 NTC 趨勢相似，但在 1998 年之後，兩個指數逐漸偏離觀測颱風生成數；可見得 GPI 和 χ GPI 指數表現不佳原因和無法掌握西北太平洋海域十年際氣候變異有關，因為 1998 年前後恰巧是太平洋年代振盪由

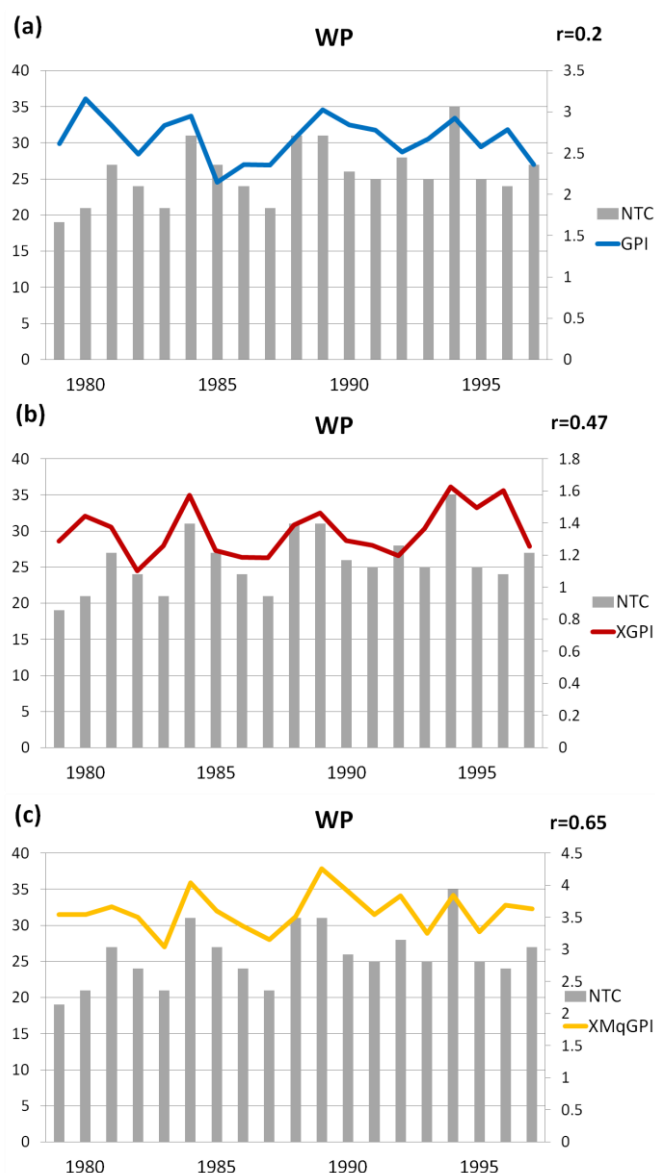


圖 3 西北太平洋 1979 年至 1997 年間，經時間空間平均後，NTC（對應左邊橫軸）與熱帶氣旋生成潛在指數（對應右邊橫軸）之年際變化時間序列：(a) GPI 指數、(b) χ GPI 指數、(c) χ MqGPI 指數。

暖相位轉成冷相位之階段(MacDonald 2005)。由於年代震盪伴隨之大氣海洋溫度變化幅度在十年時間尺度內超過全球暖化增溫幅度，因此當處於年代震盪暖相位期，年代震盪有強化全球暖化趨勢；反之，當處於年代震盪冷相位期，有減弱甚至於逆轉全球暖化情況。例如：從 1998 年起觀測到的全球暖化中斷(global warming hiatus)現象(Kosaka and Xie 2013; England et al. 2014)就是受到年代震盪影響之結果。

四、分項診斷分析

由於颱風生成潛在指數是以乘積計算，因此各項數值越大影響生成潛在指數值越大，且其中小於 1 大於 0 的值越小影響也越明顯，呈現非線性特徵，不容易解釋各項之貢獻。所以我們於分析五種颱風生成潛在指數各項變數的貢獻時，先取對數值，將原本算式改寫成以 2 為底之對數的形式：

$$\log_2 \text{GPI} = \frac{3}{2} \log_2 |10^5 \eta| + 3 \log_2 \left(\frac{H}{50} \right) + 3 \log_2 \left(\frac{V_{\text{pot}}}{70} \right) - 2 \log_2 (1 + 0.1 V_{\text{shear}}) \quad (8a)$$

為了方便分項分析，把上式分項寫為下面的形式：

$$\text{cGPI} = \text{cETA} + \text{cRH} + \text{cV}_{\text{pot}} + \text{cV}_{\text{shear}} \quad (8b)$$

同理， χGPI 及 χMqGPI 可表達成下列形式：

$$\chi\text{GPI} = |\eta|^3 \chi^{-4/3} \text{MAX} \left((V_{\text{pot}} - 35 \text{ms}^{-1}), 0 \right)^2 (25 \text{ms}^{-1} + V_{\text{shear}})^{-4} \quad (9a)$$

$$\text{c}\chi\text{GPI} = \text{cETA} + \text{cX} + \text{cV}_{\text{pot}} + \text{cV}_{\text{shear}} \quad (9b)$$

$$\chi\text{MqGPI} = |\eta|^3 \chi^{-4/3} \sqrt{\text{Mq}} (25 \text{ms}^{-1} + V_{\text{shear}})^{-4} \quad (10a)$$

$$\text{c}\chi\text{MqGPI} = \text{cETA} + \text{cX} + \text{cMq} + \text{cV}_{\text{shear}} \quad (10b)$$

但由於這三種生成潛在指數振幅差異頗大，在不影響各分量的相對關係下，我們取完以 2 為

底對數後，再將各個分量除以該指數的標準差，將三種指數以標準化(standardization)形式呈現，讓它們在同一數量級下比較，如此較易判讀各項的空間分佈關係。

在西北太平洋海域，正值 GPI 指數分佈於 5°N-30°N，110°E-170°E 範圍內（圖 4）。從分項結果討論，絕對渦度分項(cETA)為主要正貢獻項，其值隨緯度遞增（圖 4b）；中層相對濕度分項(cRH)在副熱帶高壓範圍內為負貢獻，其他地區為正貢獻，近赤道地區正貢獻強度較強（圖 4c）；強度潛勢分項(cVpot)(圖 4d)大約以北緯 20°N 為界線，以北負貢獻隨緯度增加而增加，以南則為正貢獻；垂直風切分項(cVshear)扮演主要的負貢獻角色（圖 4e），在颱風主要生成區域，負貢獻值明顯小於其他區域。

圖 5 為 χGPI 指數在西北太平洋海域空間上的分佈，正值區位於 10°N-25°N，110°E-180°範圍內。其分項結果顯示，絕對渦度分項與強度潛勢分項（圖 5b、d）為主要正貢獻項，而垂直風切分項為主要的負貢獻項（圖 5e）；濕熵差分項(cX)（圖 5c）在副熱帶高壓範圍內為較弱的貢獻，靠近赤道值較大。圖 6 為 χMqGPI 指數在空間上的分佈，正值區位於 5°N-35°N，110°E-180°內，範圍較前述兩種指數顯著增加。各分項在西北太平洋海域空間分佈除了數值略有差異以及水氣凝結度分項(cMq)大值區較強度潛勢分項(cVpot)偏北之外，整體而言， χMqGPI 指數空間分佈和 χGPI 指數相似。

討論完空間分項特徵後，我們接著來探討年際變化分項診斷之結果。在西北太平洋海域，GPI 指數大約可以 1998 年為分界點，1998 年之前大多為負相位，之後則轉為正項位為主（圖 7a）。從

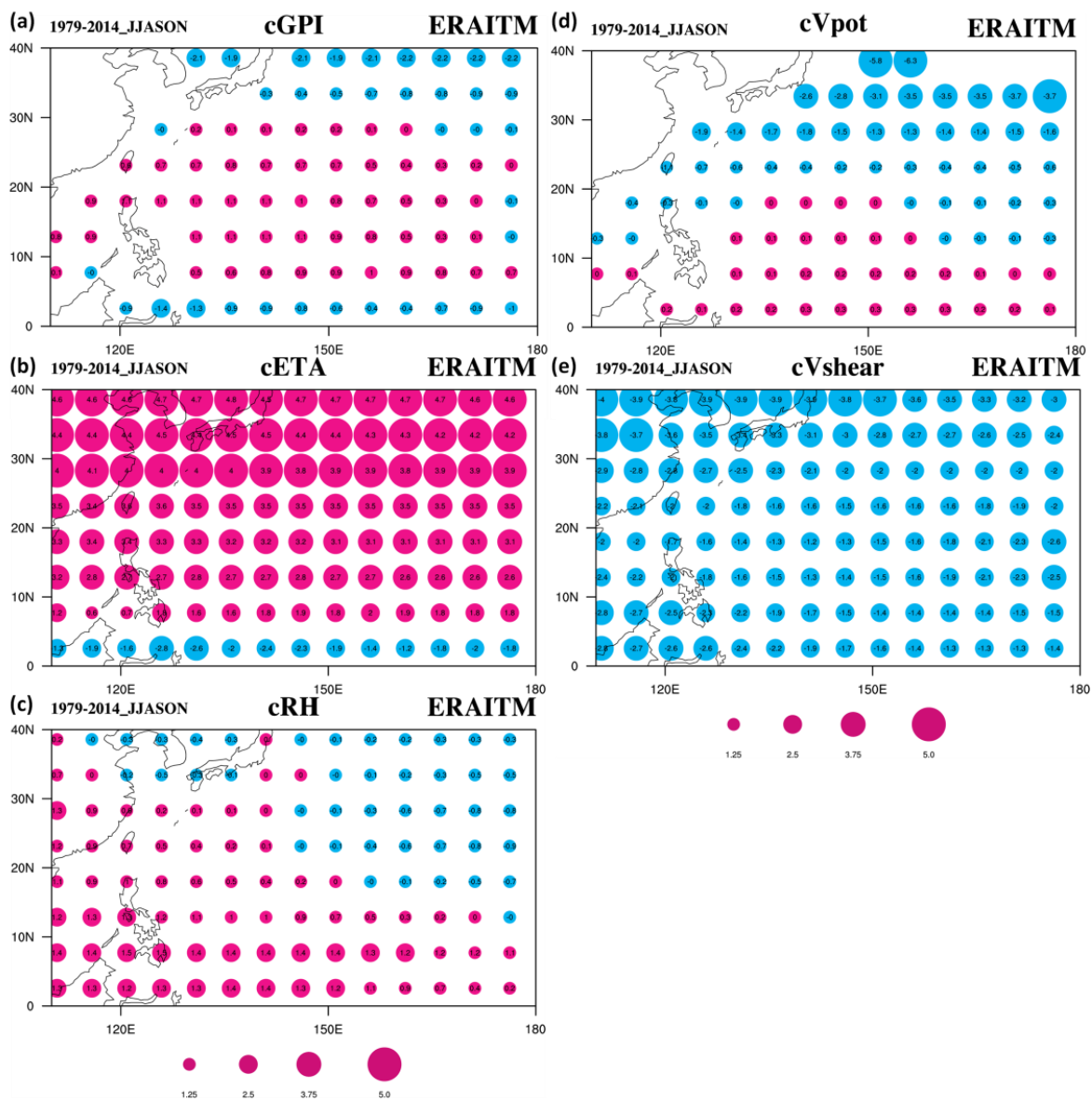


圖 4 西北太平洋 GPI 指數空間分項分析：(a) GPI、(b)絕對渦度、(c)相對溼度、(d)強度潛勢、(e)垂直風切。紅色表示正值，藍色表示負值。圓點中標示之數值代表該物理量在格點之確切數值。

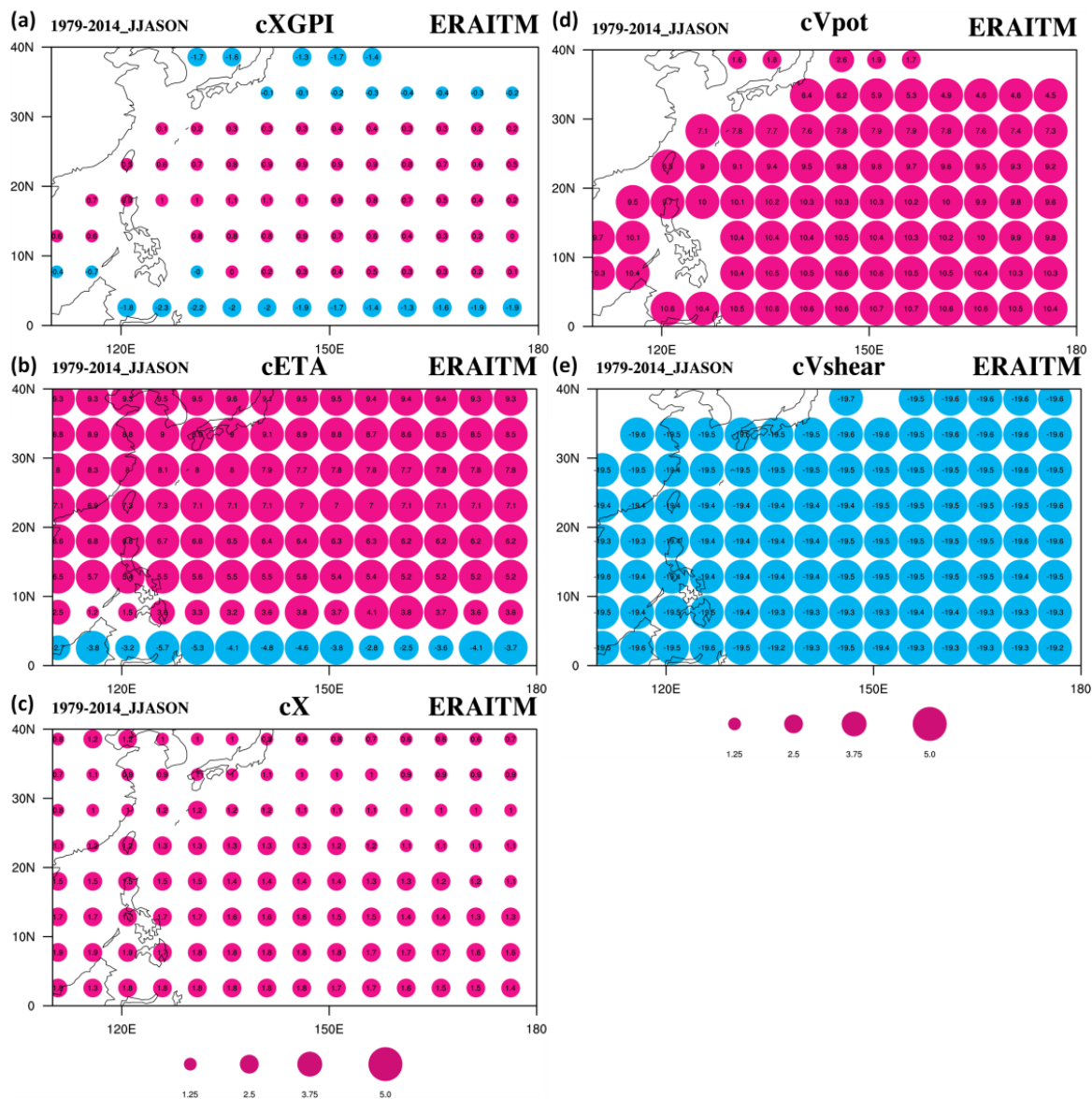


圖 5 西北太平洋 χ GPI 指數空間分項分析：(a) χ GPI、(b) 絕對渦度、(c) 濕熵差、(d) 強度潛勢、(e) 垂直風切。紅色表示正值，藍色表示負值。圓點中標示之數值代表該物理量在格點之確切數值。

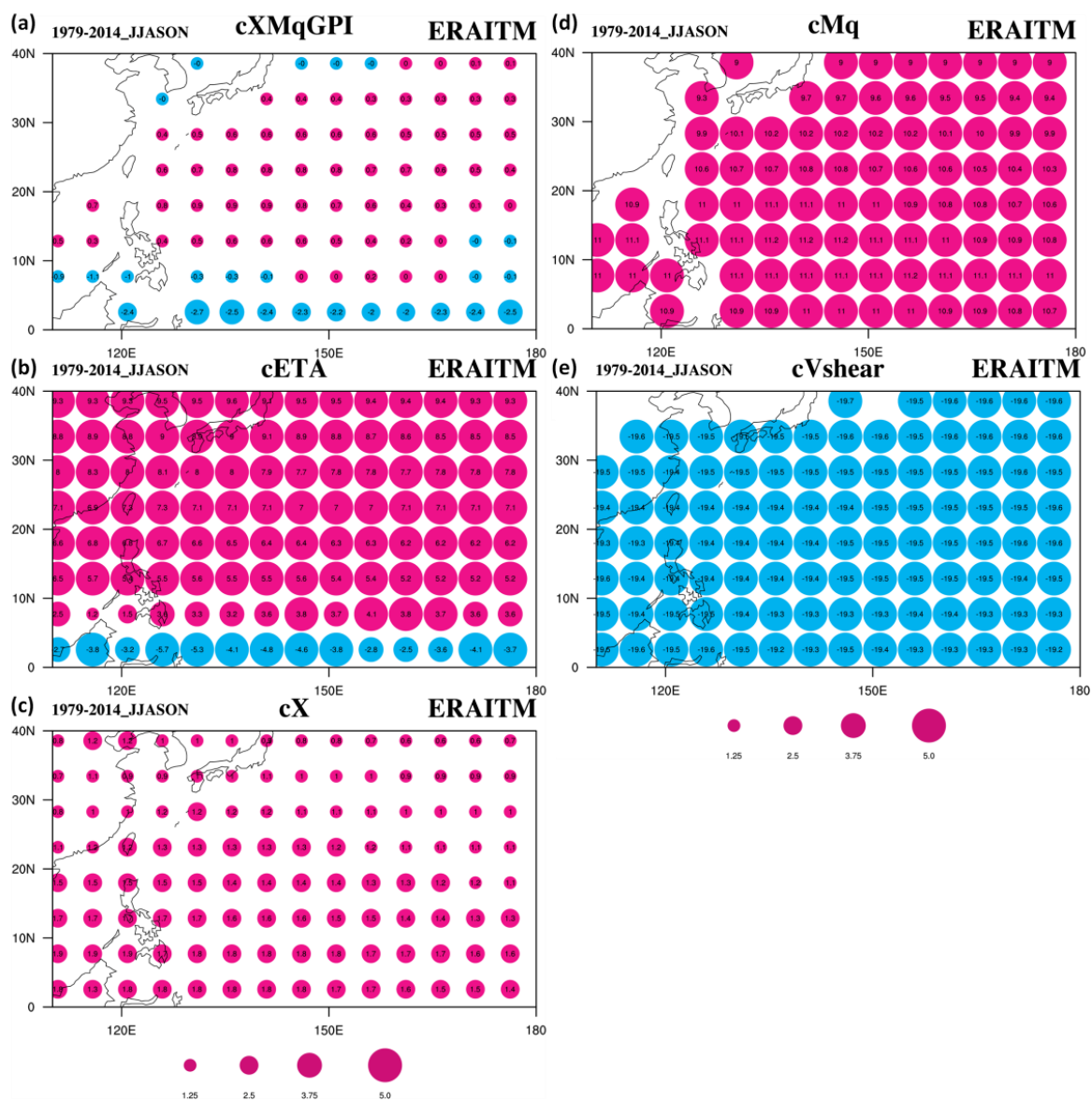


圖 6 西北太平洋 χ MqGPI 指數空間分項分析：(a) χ MqGPI、(b)絕對渦度、(c)濕熵差、(d) Mq 項、(e)垂直風切。紅色表示正值，藍色表示負值。圓點中標示之數值代表該物理量在格點之確切數值。

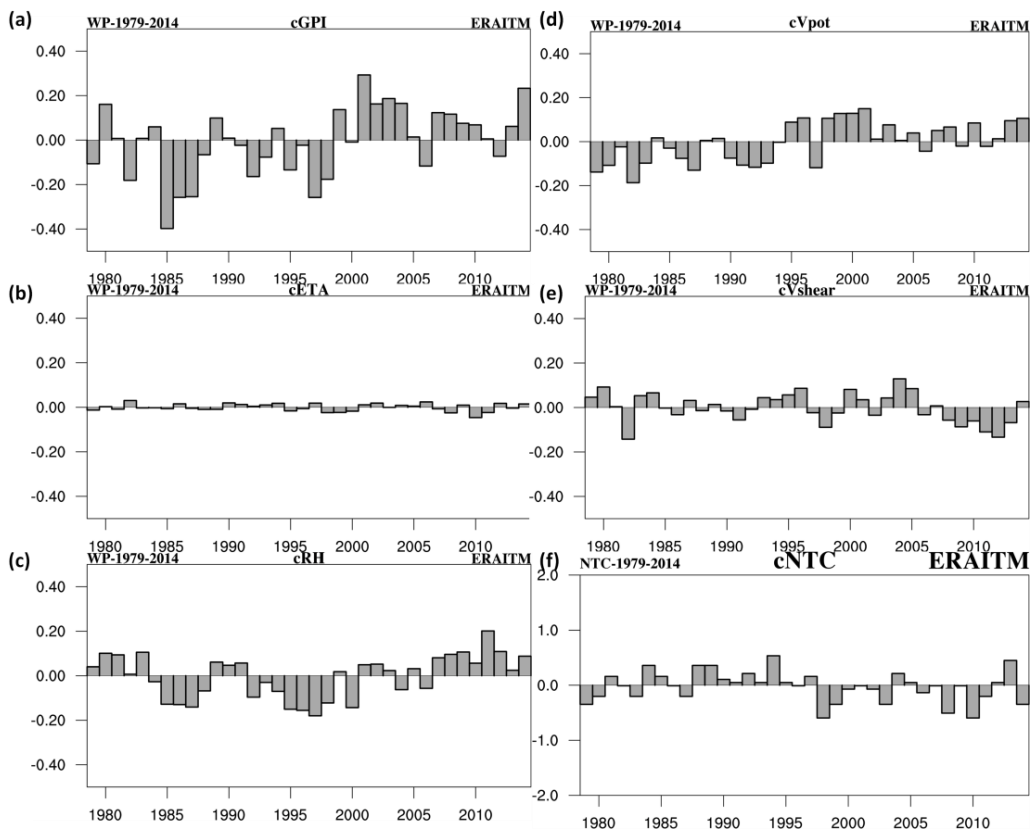


圖 7 西北太平洋 GPI 指數年際變化分項分析：(a) GPI、(b)絕對渦度、(c)相對濕度、(d)強度潛勢、(e)垂直風切、(f)颱風數。

GPI 指數分項診斷的結果顯示，上述變化趨勢主要由中層相對濕度與強度潛勢兩分項所主導（圖 7c、d），而相對濕度分項與垂直風切分項雖然有一部分彼此互相抵銷（圖 7c、e），但兩者相加後所顯示出來時間變化趨勢和 cGPI 項並不相符（圖未附），顯見非影響 GPI 指數年際變化因素。綜合以上分析，我們可以明顯的看出來，GPI 指數年際變化主要受到強度潛勢分項的控制。

由 χ GPI 指數的分項結果顯示， χ GPI 指數主要受到濕熵差、強度潛勢、及垂直風切三個分項所控制（圖 8c、d、e），其中濕熵差和強度潛勢顯然是主要的正貢獻項。與 GPI 指數分項結果比較， χ GPI 指數的數值提高了 50%左右，主要是當相對

濕度項替換成濕熵差後，降低了該項對整體指數貢獻比例所致。不過由於濕熵差數值遠較強度潛勢小，因此 χ GPI 指數年際變化主要還是受到強度潛勢分項的影響。

反之， χ MqGPI 指數年際變化特徵（圖 9）與 GPI 和 χ GPI 指數完全不同， χ MqGPI 指數不僅隨時間無增加趨勢，且在 2000 年後 χ MqGPI 指數和西北太平洋海域實際颱風活動變化趨勢相近（圖 9f）。若從 χ MqGPI 指數分項結果來看，上述由正相位轉為負相位趨勢主要由水氣凝結度分項所主導（圖 9d），因此，以水氣凝結度(Mq)取代強度潛勢(Vpot)似乎是大幅提高 χ MqGPI 指數在西北太平洋海域表現的主要關鍵。

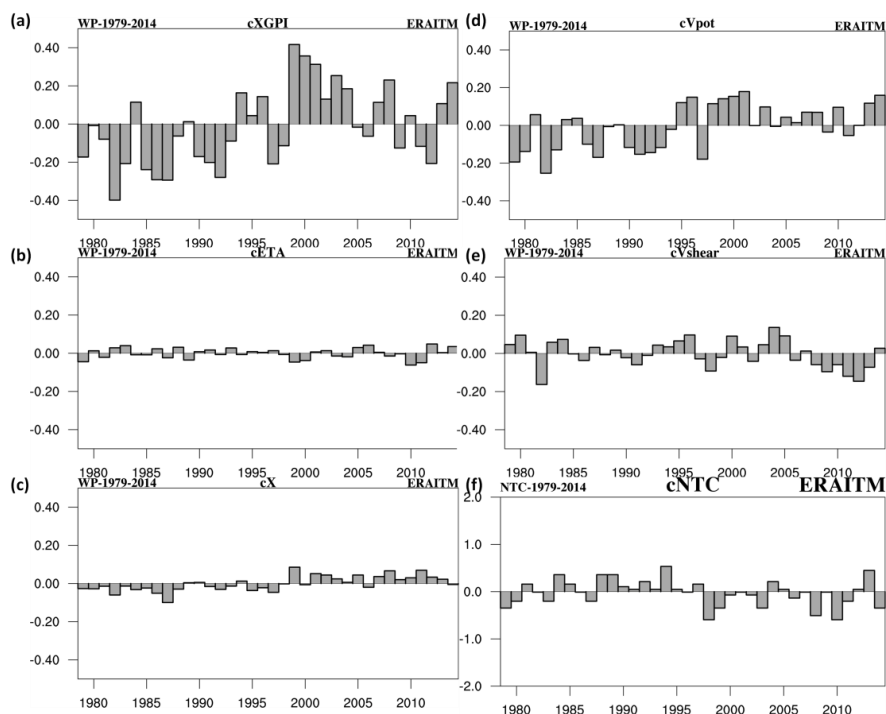


圖 8 西北太平洋 χ GPI 指數年際變化分項分析：(a) χ GPI、(b)絕對渦度、(c)濕熵差、(d)強度潛勢、(e)垂直風切、(f)颱風數。

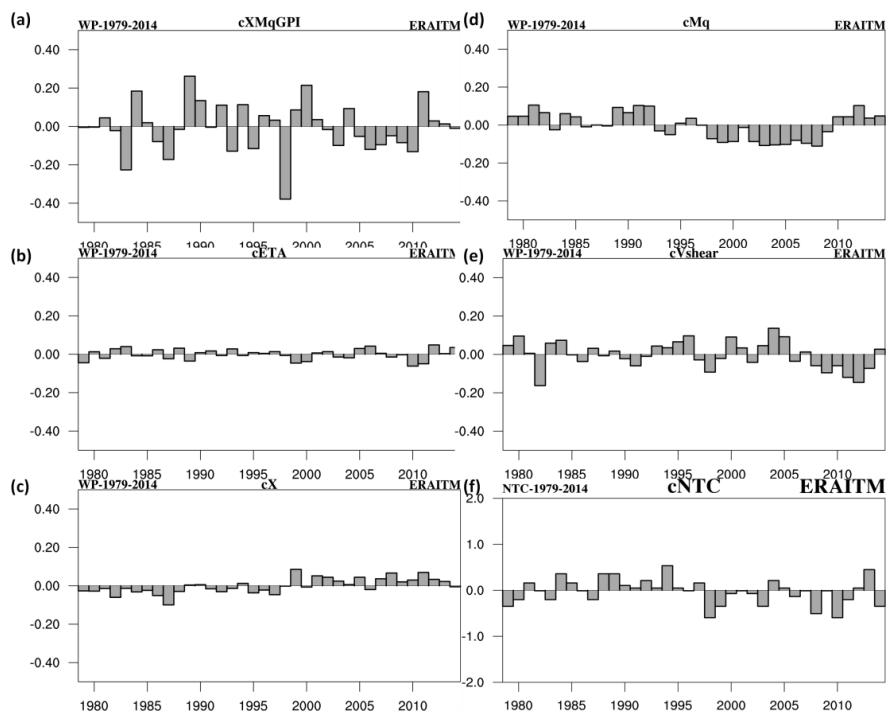


圖 9 西北太平洋 χ MqGPI 指數年際變化分項分析：(a) χ MqGPI、(b)絕對渦度、(c)濕熵差、(d) Mq 項、(e)垂直風切、(f)颱風數。

從(5)式水氣凝結度(Mq)定義來看，決定水氣凝結度大小因素有兩個：水氣垂直梯度($\partial_p \bar{q}$)和對流強度($\Omega(p)$)。最近一系列探討全球暖化對熱帶對流強度和降水影響文獻顯示(Chen et al. 2016; Bui et al. 2016; Liu et al. 2017)，熱帶地區之對流強度($\Omega(p)$)對對流層大氣溫度變化非常敏感；當大氣溫度升高時，對流核心區域（如：間熱帶輻合區 ITCZ）對流強度會顯著增強（亦即產生所謂「富者越富」(rich-get-richer)情況）。由於太平洋年代振盪伴隨之區域大氣海洋溫度變化幅度($\sim 0.5^\circ\text{C}/\text{decade}$)不亞於全球暖化增溫幅度($\sim 1^\circ\text{C}/\text{century}$)，這種水氣凝結度受對流層大氣溫度控制之特性有助於反應出太平洋年代振盪對西北太平洋海域颱風活動影響。

五、結論與討論

本研究藉由分析 GPI、 χGPI 和 χMqGPI 指數在西北太平洋海域的表現發現，三個颱風生成潛在指數在模擬季節循環的表現都與觀測颱風活動極為相近，可以說三種指數都可以準確的掌握颱風活動的季節變化。但當我們分析年際變化特徵時發現，GPI 和 χGPI 指數在西北太平洋海域的結果都十分不理想，主要原因是上述兩種指數無法掌握西北太平洋海域特有的十年際氣候變異特徵所致。

GPI 和 χGPI 熱帶氣旋生成潛在指數除了包含渦度、中低對流層濕度、垂直風切等傳統影響颱風生成之大尺度環境條件外，主要創新在於以潛在強度(Potential Intensity)項取代大氣穩定度和海溫之效應。潛在強度的設計理念是將熱帶氣旋視為一個理想化的「卡諾熱機」(Carnot heat engine)，亦即熱帶氣旋擾動在暖洋面上獲得能量透過外流(outflow)輸出過程和周圍環境達到平衡

狀態。據此，潛在強度由熱帶氣旋中心和周圍環境間最大可用位能差決定，其量值並無上限。不少研究已顯示(Wang and Wu 2004; Camargo et al. 2007; Lin et al. 2013; Song et al. 2015)，上述設計對於環境熱力場（如：濕度、海溫）的變動非常敏感，極有可能會高估熱帶氣旋生成潛勢。

最近 Yu et al. (2017)也研究發現，GPI 和 χGPI 指數中的強度潛勢(V_{pot})項主要受到環境熱力場中的海溫變化所主導，因此 GPI 和 χGPI 指數時間序列反應出的是全球暖化趨勢，亦即隨著地表溫度上升，颱風活動會越來越頻繁。這種結果在其他海域或許是正確的（如：北大西洋海域），但在西北太平洋海域，聖嬰/南方震盪和太平洋年代振盪這兩類自然氣候變異對颱風活動影響並不亞於全球暖化效應，因此一個成功的颱風生成潛在指數必須有能力反應出太平洋海域的自然氣候變異特徵。綜合以上的結果顯示，本文介紹的 χMqGPI 指數以水氣凝結度(Mq)取代強度潛勢(V_{pot})有能力反應出西北太平洋海域颱風活動的長周期變化特徵。未來我們將利用 χMqGPI 指數，結合 CMIP5 氣候模式模擬 21 世紀中後期資料，用以推估未來西北太平洋海域颱風活動的可能變化。

致謝

本研究由科技部專題計畫 MOST104-2111-M-008-026-MY2 及 MOST105-2111-M-008-025-MY3 共同支助所完成。研究所使用的颱風資料下載自美國國家海洋大氣管理局資料庫，大氣再分析資料則下載自歐洲中期天氣預報中心資料庫。作者感謝兩位審查委員提供的寶貴意見，使本文內容得以更為完善。

參考文獻

- Bengtsson, L., M. Botzet, and M. Esch, 1995: Hurricane-type vortices in a general circulation model. *Tellus A*, **47**, 175-196.
- Bessafi, M., and M. Wheeler, 2006: Modulation of South Indian Ocean tropical cyclones by the Madden – Julian Oscillation and convectively coupled equatorial waves. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 638-656.
- Bister, M., and K. Emanuel, 1997: The genesis of hurricane Guillermo: TEXMEX analyses and a modeling study. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2662-2682.
- Bister, M., and K. Emanuel, 1998: Dissipative heating and hurricane intensity. *Meteor. Atmos. Phys.*, **65**, 233-240.
- Bister, M., 2002: Low frequency variability of tropical cyclone potential intensity 1. Interannual to interdecadal variability. *J. Geophys. Res.*, **107**, D24.
- Bruyère, C., G. Holland, and E. Towler, 2012: Investigating the use of a genesis potential index for tropical cyclones in the North Atlantic basin. *J. Climate*, **25**, 8611-8626.
- Bui, H. X., J.-Y. Yu, and C. Chou, 2016: Impacts of vertical structure of large-scale vertical motion in tropical climate: Moist static energy framework. *J. Atmos. Sci.*, **73**, 4427-4437, doi:10.1175/JAS-D-16-0031.1.
- Camargo, S. J. and S. E. Zebiak, 2002: Improving the detection and tracking of tropical cyclones in atmospheric general circulation models. *Weather and Forecasting*, **17**, 1152-1162.
- Camargo, S., A. Barnston, and S. Zebiak, 2005: A statistical assessment of tropical cyclone activity in atmospheric general circulation models. *Tellus A*, **57**, 589-604.
- Camargo, S., A. Sobel, A. Barnston, and K. A. Emanuel, 2007: Tropical cyclone genesis potential index in climate models. *Tellus A*, **59**, 589-604.
- Camargo, S., 2013: Global and regional aspects of tropical cyclone activity in the CMIP5 models. *J. Climate*, **26**, 9880-9902.
- Chan, J. C. L., 1985: Tropical cyclone activity in the Northwest Pacific in relation to the El Niño/Southern Oscillation phenomenon. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 599-606.
- Chan, J. C. L., 2000: Tropical cyclone activity over the western north Pacific associated with El Niño and La Niña events. *J. Climate*, **13**, 1960-1972.
- Chan, J. C. L., 2006: Comment on “Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment”. *Science*, **311**, 1713-1713.
- Chen, T.-C., and J.-M. Chen, 1995: An observational study of the South China Sea monsoon during the 1979 summer: Onset and life cycle. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2295-2328.
- Chen, C.-A., J.-Y. Yu, and C. Chou, 2016: Impacts of vertical structure of convection in global warming: The role of shallow convection. *J. Climate*, **29**, 4665-4684, doi:10.1175/JCLI-D-15-0563.1.

- Chien, F., and H. Kuo, 2011: On the extreme rainfall of typhoon Morakot (2009). *J. Geophys. Res.*, **116**.
- Emanuel, K. A., 1988: The maximum intensity of hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 1143-1155.
- Emanuel, K. A., 1995: Sensitivity of tropical cyclones to surface exchange coefficients and a revised steady-state model incorporating eye dynamics. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 3969-3976.
- Emanuel, K. A., and D. S. Nolan, 2004: Tropical cyclone activity and global climate. Preprints, *26th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami, FL, Amer. Meteor. Soc.*, 240-241.
- Emanuel, K. A., 2005: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, **436**, 686-688.
- Emanuel, K. A., 2006: Climate and tropical cyclone activity: A new model downscaling approach. *J. Climate*, **19**, 4797-4802.
- Emanuel, K. A., 2008: The hurricane – climate connection. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89.5**, ES10-ES20.
- Emanuel, K., 2010: Tropical cyclone activity downscaled from NOAA-CIRES Reanalysis, 1908–1958. *J. Adv. Model. Earth Sys*, **2**, 1-12.
- Emanuel, K., 2013: Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **110**, 12219-12224.
- Gall, J., I. Ginis, S. Lin, T. Marchok, and J. Chen, 2011: Experimental tropical cyclone prediction using the GFDL 25-km-resolution global atmospheric model. *Weather and Forecasting*, **26**, 1008-1019.
- Graumann, A., and Coauthors, 2005: Hurricane Katrina, A climatological perspective, *NOAA's National Climatic Data Center Technical Report 2005-1*, 27pp.
- Gray, W., 1968: Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 669-700.
- Gray, W., 1979: Hurricanes: their formation structure and likely role in tropical circulation. *Meteorology over the Tropical Oceans* (ed. D. B. Shaw), *Royal Meteorological Society*, 155-218.
- Gray, W. M., 1988: Environmental influences on tropical cyclones. *Aust. Met. Mag.*, **36**, 127-139.
- Gray, W., 1998: The formation of tropical cyclones. *Meteor. Atmos. Phys.*, **67**, 37-69.
- Hsu, H.-H., C.-H. Hung, A.-K. Lo, C.-C. Wu, and C.-W. Hung, 2008: Influence of tropical cyclones on the estimation of climate variability in the tropical western North Pacific. *J. Climate*, **21**, 2960-2975.
- Koh, J., and C. Brierley, 2015: Tropical cyclone genesis potential across palaeoclimates. *Climate of the Past*, **11**, 1433-1451.
- Krishnamurti, T. N., 1985: Summer Monsoon Experiment – A Review. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 1590-1626.

- Li, W., G. Joos, and J. Belanger, 2010: Real-time simulation of a wind turbine generator coupled with a battery supercapacitor energy storage system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **57**, 1137-1145.
- Lin I.-I., P. Black, J. F. Price, C.-Y. Yang, S.-S. Chen, C.-C. Lien, P. Harr, N.-H. Chi, C.-C. Wu, and E. A. D'Asaro, 2013: An ocean coupling potential intensity index for tropical cyclones. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 1878–1882, doi:10.1002/grl.50091.
- Lin, I.-I., and J. C. L. Chan, 2015: Recent decrease in typhoon destructive potential and global warming implications. *Nature Communications*, 7128(2015), doi:10.1038/ncomms8182.
- Liu, H.-W., J.-Y. Yu, and C.-A. Chen, 2017: Changes of tropical precipitation under global warming projected by CMIP5 model simulations. *Terr. Atmos. and Ocean. Sci.* (under 2nd review)
- MacDonald, G. M., 2005: Variations in the Pacific Decadal Oscillation over the past millennium. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L08703, doi:10.1029/2005GL022478.
- Manabe, S., J. Holloway, and H. Stone, 1970: Tropical Circulation in a Time-Integration of a Global Model of the Atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **27**, 580-613.
- Murakami, H. et al., 2012: Future changes in tropical cyclone activity projected by the new high-resolution MRI-AGCM*. *J. Climate*, **25**, 3237-3260.
- Song Y., L. Wang, and X. Lei, and X. Wang, 2015: Tropical cyclone genesis potential index over the western North Pacific simulated by CMIP5 Models. *Adv. Atmos. Sci.*, **32**, 1539-1550, doi: 10.1007/s00376-015-4162-3.
- Vitart, F., J. Anderson, and W. Stern, 1997: Simulation of interannual variability of tropical storm frequency in an ensemble of GCM integrations. *J. Climate*, **10**, 745-760.
- Waliser, D., K. Sperber, H. Hendon, D. Kim, E. Maloney, M. Wheeler, F. Vitart, and W. Higgins, 2009: MJO simulation diagnostics. *J. Climate*, **22**, 3006-3030.
- Wang, Y., and C.-C. Wu, 2004: Current understanding of tropical cyclone structure and intensity changes – a review. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **87**, 257-278, doi:10.1007/s00703-003-0055-6
- Webster, P., 2005: Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, **309**, 1844-1846.
- Yu, J.-Y., and J. D. Neelin, 1997: Analytic approximations for moist convectively adjusted regions. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 1054-1063.
- Yu, J.-Y., C. Chou, and J. D. Neelin, 1998: Estimating the gross moist stability of the tropical atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 1354-1372.
- Yu, J.-Y., L.-P. Hsiao, and P.-G. Chiu, 2018: Evaluating the Emanuel-Nolan genesis potential index: Contrast between North Atlantic and western North Pacific. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, doi:10.3319/TAO.2017.09.27.01 (in press).

A Typhoon Genesis Potential Index for Western North Pacific

Li-Peng Hsiao¹ Jia-Yuh Yu²

¹Graduate Institute of Geosciences, Chinese Culture University

²Department of Atmospheric Sciences, National Central University

(manuscript received 22 September 2017 ; in final form 8 December 2017)

ABSTRACT

Based on the early study of Emanuel and Nolan's (2004) original genesis potential index (GPI) and the Emanuel's (2010) revised version (χ GPI), in which the relative humidity term was replaced by moist entropy deficit, we proposed a new typhoon genesis potential index (χ MqGPI) designed specifically for the western North Pacific basin. We utilized the NOAA's best-track typhoon data and ECMWF's atmospheric reanalysis data to demonstrate the advantage of χ MqGPI over the western North Pacific in comparison with GPI and χ GPI.

Key Words: Western North Pacific, Tropical Activity, Genesis Potential Index.

doi: 10.3966/025400022017094503002