

熱帶雲簇與颱風生成：發展與未發展雲簇系統與其大環境場之關係

黃建齊

國立中央大學大氣科學學系碩士班

摘 要

熱帶氣旋生成僅於持續和組織完整的對流系統中發展，而問題在於有些雲簇而後會發展成熱帶氣旋，有些卻不會形成。為回答這個問題，需有客觀一致的方法以分析會發展及不會發展的系統間的特性差異，始可適當說明。本篇研究的工作即在於此：針對會發展及未發展雲簇的環境條件進行系統性的分類，以歸納兩者的環境條件差異。

本研究使用西北太平洋 2003 年至 2010 年間 7 月至 10 月長達 8 年的逐時紅外線衛星雲圖和全球模式分析資料。雲簇之定義則定為雲頂溫度低於 208 K 之區域，一般其大小都落在綜觀尺度範圍之間。根據連續逐時衛星雲圖中雲簇之重疊區域大小，定義被追蹤的雲簇群為 time cluster。本篇分析結果顯示每個熱帶氣旋的形成幾乎都與持續 8 個小時以上的 time clusters 有關，因此 8 小時 time cluster 可視為熱帶氣旋生成所需之基本條件。

氣旋式低層渦度、弱垂直風切、低層輻合和對流層水氣等大尺度環境條件，在統計上皆與發展系統較為相關的。然而，許多會發展系統仍會在看似不適合生成的環境下（即無上述環境條件存在）於 24 小時內發展而成氣旋，未發展系統則無法發展成氣旋。

關鍵詞：熱帶雲簇、颱風、旋生

一、前言

熱帶地區對流主宰的形式為中尺度對流系統 Mesoscale Convective Systems (MCSs)，其又伴隨著對流核心和層狀降水 (Houze 1977; Zipser 1977)。熱帶旋生—原始獨立的暖心渦旋—並不會在沒有低層輻合之下出現 (Gray 1968)。一般對於熱帶氣旋旋生的認知是渦旋系統處在較強的低層輻合帶和較為潮濕的大氣環境之中，這樣的環境是適合旋生的。然而，這些適合旋生的環境條件出現次數卻比旋生案例還要多上許多。什麼條件對於熱帶氣旋旋生是較有效率的？還有

MCS 在熱帶氣旋旋生的過程中扮演甚麼角色？為了回答這些問題，先必須以客觀一致的方法了解會發展及不會發展的系統間的特性。

大環境場與熱帶氣旋旋生的關係很密切，常用的條件有：區域平均渦度、垂直風切、低層輻合和水氣含量 (Gray 1968; Demaria et al. 2001; Schumacher et al. 2009)。然而，實際旋生過程非常依賴具大小變化的對流系統和與大環境擾動的交互作用 (Simpson et al. 1997, 1998; Houze 2010)。Tory and Frank(2010) 提供從大尺度和綜觀尺度角度觀察熱帶氣旋生成的細節。

二、資料來源

在探究生成與未生成系統時，會發現其中有些模稜兩可的部分，那就是熱帶氣旋生成的定義。Frank (1987) 定義熱帶氣旋生成是熱帶擾動轉變成熱帶低壓 (TD) 時，周圍有一封閉的風場，這個定義與 NHC 和 JTWC 相似。熱帶低壓 TD 轉變成熱帶風暴 TS 的過程稱為「發展」，而從熱帶風暴 TS 轉變為熱帶氣旋 hurricane 時稱為「增強」。

因為熱帶氣旋生成定義不清和缺乏熱帶海域較為詳細、高解析度的資料，所以不可能非常精確的定義出熱帶氣旋實際的生成時刻，在時間解析為 6 小時的 best track 資料都無法得到。於本篇研究中，在 JTWC best track 裡最先出現 TD 或 TS 的點將訂定為熱帶氣旋生成的時刻。

JTWC best-track 資料包含熱帶氣旋每 6 小時的強度和經緯度位置，還有其他未命名的低壓及亞熱帶氣旋。考慮使用 2003 年至 2010 年 7 月至 10 月， 0° – 35° N, 100° – 160° E 範圍(如圖 1)的熱帶氣旋，共有 84 個颱風(typhoon)、39 個熱帶風暴(tropical storm)和 17 個熱帶低壓(tropical depression)。其中有 4 個颱風和 1 個熱帶風暴是從研究海域的東

方進入的，並有其他 3 個颱風是在 6 月底生成跨入 7 月的。對於這些氣旋，其旋生前的雲簇將不會納入考量。

在衛星資料部分，本篇使用了 MTSAT、TRMM TMI 兩個衛星的資料。MTSAT IR1 頻道波段為 $10.5\text{--}11.5\ \mu\text{m}$ 解析度為 resolution 0.05° 。使用每小時的 IR 亮溫資料是要辨認且在雲簇的生命週期中完整追蹤。TRMM TMI 資料可以反演總可降水量(*total precipitable water*)和最佳內插的海表面溫度，這兩者將當作雲簇的環境濕度和海表面溫度。海表面溫度使用每天的資料，會將其 0.25° 解析度平均為半徑 1° ，而且觀測的有效資料面積需大於 50% 以上，因為該衛星在陸地上的觀測並不會採納進去，所以這個設定亦可作為剔除陸地影響的條件。水氣場部分則使用 3 天平均的 TMI 衛星資料，因為熱帶海洋上方的邊界層常常都是潮濕的狀態，所以總可降水量變化都是由於中層水氣含量的變化所致。

此外，本篇還採用 NCEP FNL 作為全球分析場資料，其解析度為 1° 每 6 小時一筆。為需要辨認和追蹤與熱帶氣旋相關的渦度最大值。此外，該資料還用來找出當時雲簇所處的大尺度環境狀況，像是垂直風切和近地表輻合量。

三、研究方法

為追蹤颱風生成之前的雲簇，以下為本文篩選的步驟：

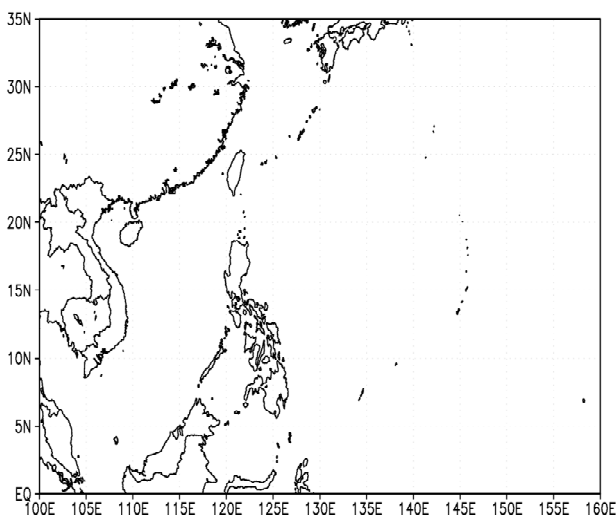
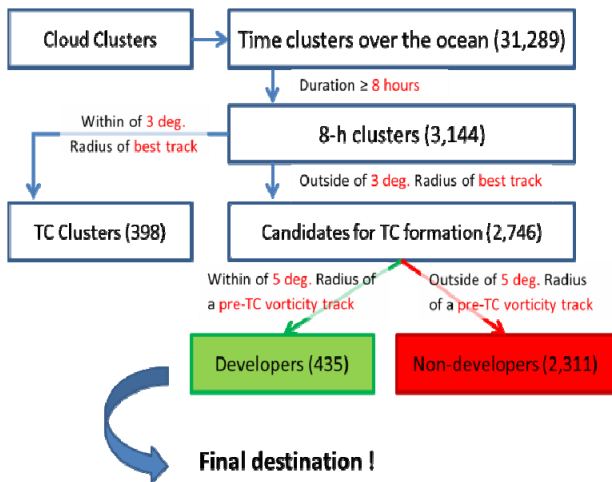


圖1. 研究範圍



(一)雲簇

根據 Williams and Houze (1987)，定義雲簇之亮度溫度低於閾值且圍繞面積為 5000 km^2 的區域，有些案例的圍繞面積會達到 $10,000 \text{ km}^2$ 。最小面積閾值並不重要；然而，我們所注意的長時間對流系統都會高於 $5,000 \text{ km}^2$ 。根據前人研究 western Pacific during the Tropical Ocean and Global Atmosphere Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment (TOGA COARE; Mapes and Houze 1993) 的結果，將雲頂亮溫閾值設定為 208 K。閾值 208 K 可濾去並未降雨的砧狀雲，其中雲頂亮溫小於 208 K 的區域大部分是對流降雨系統。

需要注意的是，據許多前人研究，都是使用較為溫暖的溫度閾值和／或主觀的追蹤方法去綜觀尺度的雲簇。本研究則使用客觀追蹤中尺度對流系統的方法，定義 208 K 的雲頂範圍大略為降雨的範圍。雲簇被定義之後，則定義雲簇的中心為亮溫小於 208 K 區域的幾何中心。定義雲簇的大小以半徑表示，其半徑的算法為該雲簇面積相當的圓面積半徑。

圖 2 顯示 2008 年 9 月 8 日 00 UTC 客觀認定出來的雲簇。最大的雲簇半徑為 340 公里，位置接近 $16^\circ\text{N}, 126^\circ\text{E}$ ，此雲簇即為颶

風 Sinlaku。

(二)時間雲簇

Time clusters 是由具不定生命期長度和面積大小不一的雲簇所組成。只要雲簇在每小時連續的衛星影像中面積重疊 50 % 或 $10,000 \text{ km}^2$ 以上時，則視為同一個 time cluster。

在此之後，文章中的會使用 time clusters 代表對流雲系統。即 cluster 與 time cluster 同義。

大部分 time clusters 都向西移動了幾個小時且保持相對小(如圖 3)，只有少數小的 time cluster 與熱帶氣旋有關。2008 年 9 月時出現的超級強颶 Sinlaku、Hagupit、Jangmi 和熱帶風暴 Mekkhala、Higos 都與存活很久的 time cluster 有關。

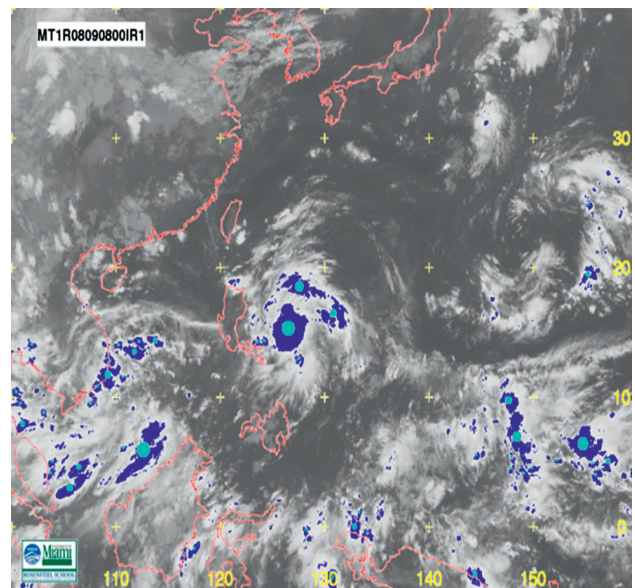


圖2. 颶風辛樂克於2008年9月8日的IR1雲圖，圖中藍色部分代表該雲頂溫度低於208K

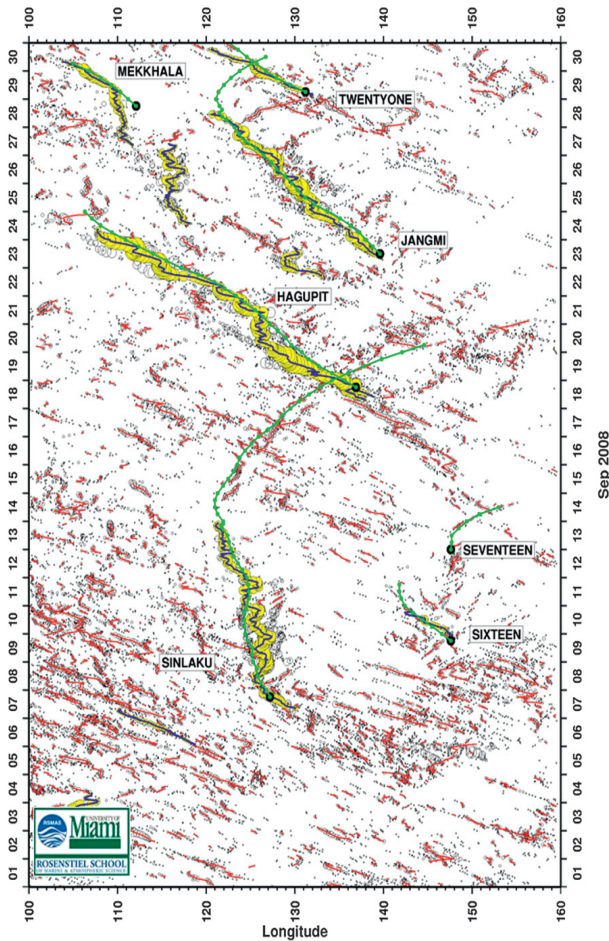


圖3. 2008年9月在研究範圍中出現的所有雲簇和時間雲簇之時間—經度圖。黑圈代表雲簇位置，圓圈大小代表等比例縮放的雲簇大小，時間雲簇則由紅線連接而成。若時間雲簇存在時間長於24小時以上者，則會分別以黃圈和藍線代表大小及路徑。JTWC發布的路徑由藍色線連接而成。

(三)原始颱風時間雲簇

在物理上，8-h cluster 都是具有長時間的對流系統，很有可能會在其生命期內發展成大面積層狀降雨的區域。觀察在此研究範圍中的所有 TD、TC 和所有持續時間長達 8 小時的 initial TC time cluster，發現在 TC 之後階段的 time cluster 所具有之範圍大小和維持時間都與整體 time cluster 相似(如圖 4)。

因為時間已經過篩選，而雲簇間的大小

並無明顯分別，因此作者加入以渦度最大值路徑的方式判斷該 8 小時 time cluster 是否真有潛力發展為颱風。

(四)追蹤最大渦度

為了辨認會旋生的 8-h cluster，採用客觀最大渦度追蹤演算法去追蹤在 best-track 定義為生成之前系統的位置。Kerns et al.(2008) 說明了渦度最大值可以在某些熱帶氣旋個案中，從其生成位置回追該雲簇的路徑。

在下一張分析時間點的圖中，距離原本點位置方圓 3° 以內且最靠近的最大渦度位置為下一個點座標。在下一個分析時間點的圖中，未發現在方圓 3° 以內的渦度最大值且大於 $2 \times 10^{-6} s^{-1}$ 的點座標時，為終止渦度追蹤的條件。

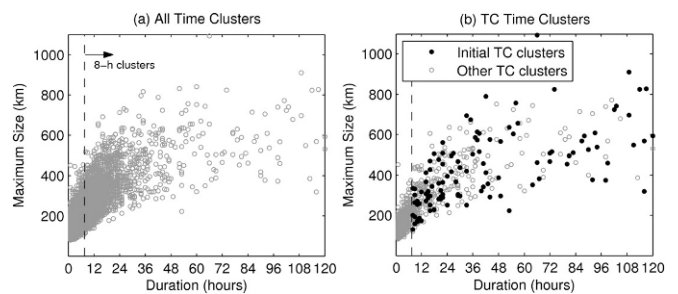


圖4. 雲簇生存時間與其最大的大小，(a)所有雲簇和 (b)偏離JTWC3度以內的雲簇。

渦度最大值一般都有向西移動的現象，常常與許多雲簇一起移動(圖 5)。圖中一部分明顯是將會發生旋生的雲簇，還參雜其他不會旋生的雲簇。每個熱帶氣旋的渦度最大值都在 best track 提供之經緯度位置的 3° 以內發現；大部分 TD 的渦度最大值都在 best track 提供之經緯度位置的 1° 以內發現。渦度最大值的路徑可以向前推至熱帶氣旋生成的前七天，還可得知那段時間該雲簇越過的主要海域。

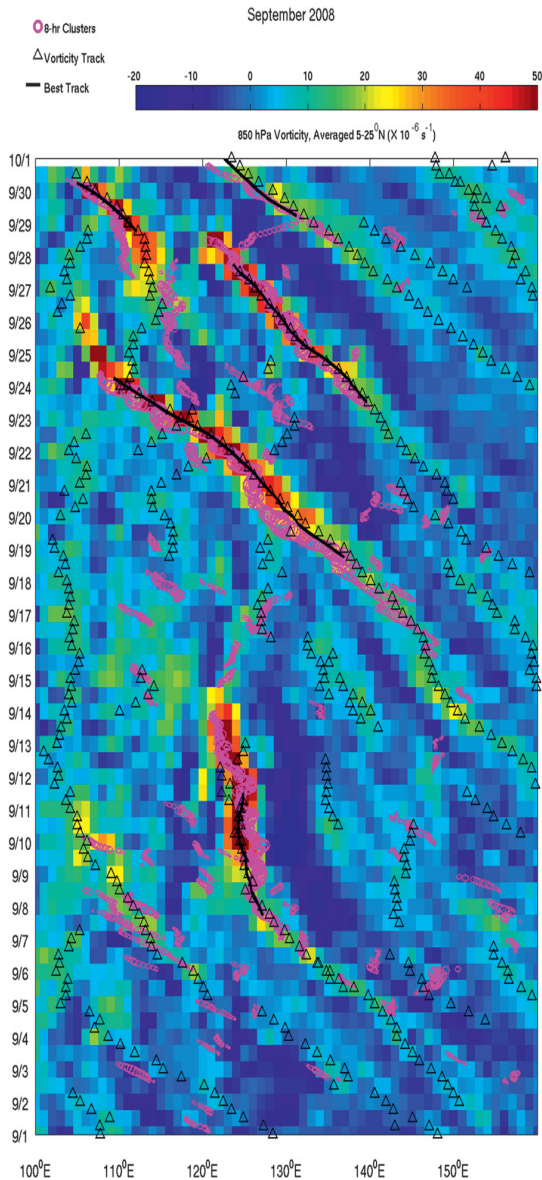


圖5. 八小時雲簇的時間—經度分布和 NCEP FNL 相對高度圖，本圖時間為2008年9月。背景顏色代表850 hPa 相對高度渦度。

(五)發展與未發展雲簇的分類

因為在 2003 年至 2010 年的 7 月至 10 月間，所有熱帶氣旋最初的發展系統都與 8-h cluster 有關，所以 8-h cluster 的出現可以算是熱帶氣旋生成時所需具有的最短維持時間和中尺度大小之必要條件，但其還不夠有效率去區分會發展與未發展系統。最短維持 8 小時時間的閾值除去許多一定不會發展的系統，只留下具有發展潛力的雲簇，這些雲簇

被歸類為可能可以旋生的候選部分。

對於會發展系統，其定義為 time cluster 存在至少 8 小時且具有可追蹤的渦度最大值，使其可回溯並可辨認出最初的雲簇來。會發展系統包含了可以以渦度最大值回溯的 pre-TC 雲簇。對於許多氣旋來說，其最初在 best track 中出現 TD 的 time cluster 可以回溯至旋生前幾個小時，甚至一天以上。此外，任何 8-h cluster 在 pre-TC 渦度路徑的 3° 範圍內就會認定其為會發展系統。會發展系統與 pre-TC 最大渦度的前導時間長度相近。

對於未發展系統，其定義為 8-h cluster 不是熱帶氣旋雲簇且不被認定為可發展系統者。許多未發展系統具有西行的渦度特徵和可追蹤的渦度中心。

五、結果與討論

發展系統與未發展系統兩者都與大環境的條件有關，低層渦度、低層輻合、垂直風切、水氣含量和海溫。在接下來的分析之中，都是在每個 8-h cluster 的完整生命期中，每小時計算一次大尺度環境條件。除了計算會發展系統及未發展系統的環境條件之外，還要計算熱帶氣旋形成後 24 小時的條件以利比較。Fig.6 中顯現出參數在發展與未發展系統間之間都有很明顯的重疊。還有，各參數之間都有明顯統計上的顯著不同，僅海平面溫度 SST 除外。以環境條件作為條件，可以得到兩組 8-h cluster 的分類。此外，由雲簇的時間序列給出的資訊使得發展與未發展的過去資料可一併驗證。

(一)環境條件

● 低層渦度

熱帶氣旋生成中最相關的統計參數是低層相對渦度 (Fig.6a)，這個結果與 McBride and Zehr (1981) 相符。會生成系統的相對渦度中位數為 1.8×10^{-6} ，相當於未生成系統的兩倍之多 9×10^{-7} 。此結

果與 Fu et al. (2012) 中提及會生成與未生成系統間的相對渦度差異僅有 20% 差異甚大。如同預期的，熱帶氣旋具有稍微比生成系統大的渦度值，這暗示了大部分大尺度相對渦度是在熱帶氣旋形成之前出現的。要注意的是系統渦度和大尺度環境渦度並不能完全分別出來。

- **低層輻合**

除了低層相對渦度之外，生成系統的低層輻合中位數約大於未生成系統的 30% (Fig.6b)。如同低層相對渦度一樣，會發展系統與未發展系統之間的差異並沒有很明顯。

- **垂直風切**

於生成系統中，垂直風切的數值明顯較小 (Fig.6c)，而生成系統垂直風切的中位數大約為 $\sim 9 \text{ m/s}$ 。有一半的會生成系統處在垂直風切 $> 9 \text{ m/s}$ 的環境中，此外約有 30% 的未生成系統處在 $< 9 \text{ m/s}$ 的環境之中。

- **衛星反演的降水量**

從衛星反演的總可降水量來看，會生成系統稍微比未生成系統高了一些，但這個還不算是可以做出明顯分別的參數 (Fig.6d)。Hennon and Hobgood (2003) 發現了總可降水量在西北太平洋海域是個不顯著的參數，這可能是因為西北太平洋海域本身就比北大西洋海域還要來的潮濕所致。

- **衛星反眼之海溫**

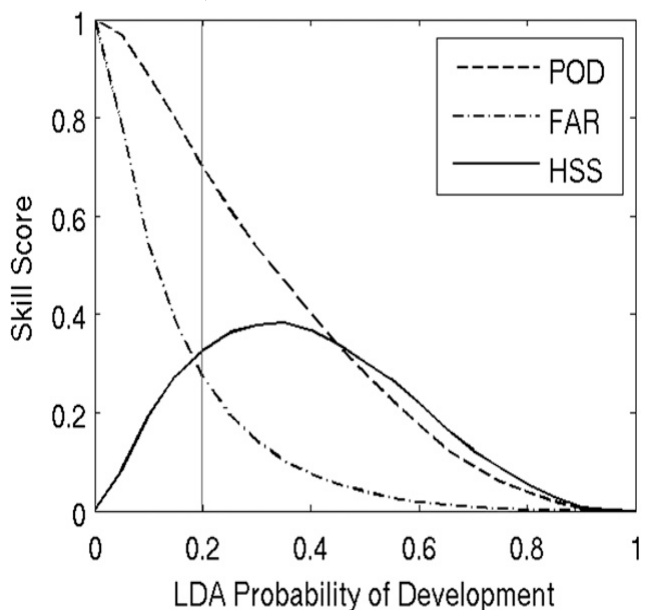
來自於衛星反演的海表面溫度在生成系統與未生成系統間並無明顯的差異 (Fig.6e)。這可能是因為西北太平洋於 7 月至 10 月時，其海溫變化範圍微小所致。

(二)線性判別分析

在統計上，會發展系統會在較為適合的環境下發生(較弱的垂直風切、較高的濕度、較強的低層渦度輻合)。線性判別分析 (LDA) 使用 Fig.10a-d 中所提及的五個環境參數，再加上 ALAT17。LDA 使用多變數最大線性組合可以決定發展與未發展整體的差異 (Perrone and Lowe 1986; Hennon and Hobgood 2003; Kerns and Zipser 2009)。從 LDA 得到的會發展系統發生機率(後驗機率)是用來當作當時環境有多適合熱帶氣旋生成的指標。系統會發展的氣候機率值 (climatological probability) 定義為

$\frac{\text{會發展系統}}{\text{所有 8-h cluster 個數}} \cong 20\%$ 。當 LDA 的算出

的機率值明顯高於氣候值，則當時環境則可視為適合熱帶氣旋生成的，反之亦然。如果



虛線、點虛線與實線分別為偵測到的機率(POD)、誤報率(FAR)與HSS分數，橫軸為線性判別分析LDA的颱風生成機率，縱軸為HSS分數。

氣候值和 LDA 得出的機率值相近時，僅能說當時環境勉強適合旋生。

Heidke skill score (HSS) 將用來定義預報的技術性。HSS 的數值介於 $0 \sim 1$ ，0 顯示無技術得分，最佳得分為 1。HSS > 0.3 是

該預報方法具有技術性的閾值。HSS > 0.3 的 LDA probability development 範圍為 0.15 至 0.5。使用氣候機率值 (20%) 來看 LDA 的效率，70% 為正確預報，30% 為 false alarm rate。在 HSS 的峰值位置 (約相當於 30% LDA probability to develop)，尚有 50% 的正確預報及 12% 的 false alarm rate。

六、結論

雲簇是熱帶氣旋生成的關鍵成分。雲簇的特徵和當時的環境條件會以發展和未發展系統情形去分析。客觀追蹤雲簇的方法是用來追蹤和分出發展和未發展系統的，以下是本篇重點：

- 31,289 個 time clusters 是從 2003-2010 年的 7 月至 10 月在西北太平洋海域所追蹤的，僅有 2,746 個 8-h clusters 被分類為可能會發展為熱帶氣旋的雲簇，其中有 435 個屬於發展系統，其餘 2,311 個屬於未發展系統。
- 一般來說，發展系統比未發展系統具有較大的低層渦度、強的低層輻合、低的垂直風切和較多的水氣含量。此外，海溫參數在兩者間並無明顯差異。
- LDA 可以有技巧的區分出發展系統與未發展系統。Heidke skill score 得分為 0.4。可正確偵測到的機率為 70%，預報錯誤率為 30%。

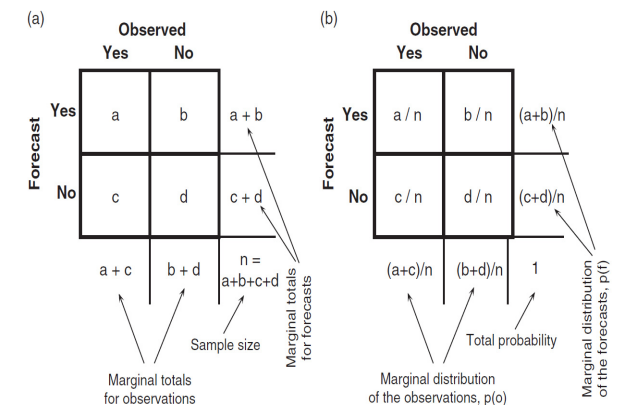
為了剔除較弱又生命期短的對流系統和確切找出較有關係的條件而加入 8-h cluster 的想法，此法可以改善對於熱帶氣旋生成的統計預測。在實際的作業環境上，追蹤雲簇的方法和 LDA 的分類，其可對大型有潛力發展成熱帶氣旋系統提供客觀統計的指標

七、參考文獻

1. Kerns, B. W., S. S. Chen, 2013: Cloud Clusters and Tropical Cyclogenesis: Developing and Nondeveloping Systems and Their Large-Scale Environment. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 192–210.
2. Schumacher, A. B., M. DeMaria, J. A. Knaff, 2009: Objective Estimation of the 24-h Probability of Tropical Cyclone Formation. *Wea. Forecasting*, **24**, 456–471.
3. Wilks, D. S., 2006: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2nd ed. Academic Press, 467 pp.

八、附錄

Heidke skill score (HSS)



$$\begin{aligned}
 \text{HSS} &= \frac{\text{正確機率} - \text{預報有} \times \text{觀測有機率} + \text{預報無} \times \text{觀測無機率}}{\text{完美預報} - \text{預報有} \times \text{觀測有機率} + \text{預報無} \times \text{觀測無機率}} \\
 &= \frac{\frac{a+d}{n} - [(a+b)(a+c) + (b+d)(c+d)]/n^2}{1 - [(a+b)(a+c) + (b+d)(c+d)]/n^2} \\
 &= \frac{2 \times (ad - bc)}{(a+c)(c+d) + (a+b)(b+d)}
 \end{aligned}$$

HSS 為一種常見的技術得分方法，用來決定預報技術是否比隨意猜測還來的好，一般認定 HSS > 0.3 時為有技巧的預報。受到 hit rate (a) 和 correct negatives (d) 的影響，數值介於 0 ~ 1 之間。0 顯示無技術得分，最佳得分為 1。Hennon et al. (2005) 指出 HSS 適合用來做罕見個案分析