

第四章 實驗結果及統計分析

4.1 路徑系集預報分析

本研究使用 WRF 模式，以 16 種不同降水物理過程參數法組合進行系集預報，圖 4.1~4.30 為各實驗(a)路徑系集預報結果及(b)中央氣象局颱風路徑潛勢預報圖，包含辛樂克颱風 21 組實驗(即圖 4.1~4.21)及薔蜜颱風 9 組實驗(即圖 4.22~4.30)，共計 30 組實驗。

根據結果指出，每組實驗均可得到 16 條路徑系集預報分布(spread)，此分布大致可以指出颱風未來可能行進的方向及侵襲的範圍，與中央氣象局發布之颱風路徑潛勢預報相近，可見其預報價值。

實驗中，除了大部分的路徑系集分布呈現一致性的預報外，仍有部分實驗結果呈現比較分歧的預報。以下兩小節將針對辛樂克及薔蜜颱風作分析討論。

4.1.1 辛樂克颱風實驗分析

圖 4.1(a)及 4.2(a)為辛樂克颱風 9 月 9 日 0000 UTC 及 1200 UTC 的實驗結果，此時段的系集預報結果呈現明顯的分歧，但大致指向臺灣東方近海移進，與圖 4.1(b)及 4.2(b)之颱風路徑潛勢預報前 72 小時的預報相符。

圖 4.3 及圖 4.4 預報分歧較小，大致預報朝台灣東部海面移進。圖 4.5(a)及圖 4.6(a)分別為 9 月 11 日 0000 UTC 及 1200 UTC 的實驗結果，系集預報路徑多集中朝向臺灣東北部，但在預報後期出現路徑轉折，因此出現相當分歧的預報結果，不確定性亦高，在這兩組實驗中，有相當多組合的預報結果將登陸臺灣；同時段圖 4.5(b)及 4.6(b)的潛勢預報亦指出辛樂克颱風由臺灣東北部登陸或通過的機率極高。

圖 4.7~4.15 為 9 月 12 日 0000 UTC~16 日 0000 UTC 的實驗結果，此時段的預報結果大致相近，辛樂克颱風均在通過臺灣北部附近後轉向日本，但部分系集預報成員因為接近陸地或降水物理過程組合影響，導致預報時數少於 120 小時，

且在預報轉向的過程中，路徑分布明顯，此結果顯示預報難度高，難以掌握轉向後之確切移動方向。

圖 4.16(a)為 9 月 16 日 1200 UTC 的實驗結果，此時段各系集預報成員多預報朝向日本海移動，亦有朝向日本九州。此後開始調整預報結果，逐漸朝日本南方近海修正，且路徑分布之幅度亦有減小，此結果顯示，當辛樂克颱風進入中緯度西風帶後，有較穩定之導引氣流，對於路徑預報有較高的信心；中央氣象局之潛勢預報亦逐漸調整預報結果。

4.1.2 薔蜜颱風實驗分析

圖 4.22(a)~圖 4.24(a)為薔蜜颱風 9 月 24 日 1200 UTC~25 日 1200 UTC 的實驗結果，可以看見系集預報結果在預報前期較為一致，但後期出現預報分歧，但大致朝向臺灣及琉球群島，並且出現在臺灣東北部附近轉向日本的預報；而圖 4.22(b)~圖 4.24(b)中央氣象局之路徑潛勢預報則指出薔蜜颱風可能朝向臺灣南端移動，但全臺灣都涵蓋在颱風路徑可能侵襲的區域。

圖 4.25(a)~圖 4.27(a)為 9 月 26 日 0000 UTC~27 日 0000 UTC 的實驗結果，系集預報出現較一致的結果，但路徑系集預報結果呈現朝向臺灣東部登陸，與原先預測有所差異，並出現登陸臺灣後減弱以致於無法有效長時間預報，但不影響預報結果；而圖 4.25(b)~圖 4.27(b)中央氣象局之路徑潛勢預報則逐漸向北修正預報路徑，預期朝臺灣東南部附近登陸。

圖 4.28(a)~圖 4.30(a)為 9 月 27 日 1200 UTC~28 日 1200 UTC 的實驗結果，系集預報結果亦相當一致，但預報修正為將從臺灣東北部地區登陸，並轉向日本南方海面，比對 JTWC 之最佳路徑也可發現在路徑掌握上相當理想；而圖 4.28(b)~圖 4.30(b)中央氣象局之路徑潛勢預報也向北修正預報路徑，朝臺灣東北部附近登陸後再轉向日本南方。

總結本節路徑系集預報分析，可以發現：第一、颱風路徑在預報初期及移速緩慢時，系集預報路徑分布範圍較大，為不確定性提供較大的預警。第二、當颱風登陸時，路徑預報會因為模擬之颱風強度減弱而無法提供長時間預報，而颱風強度減弱除地形影響外，亦可能與降水物理過程組合有關。第三、當環境駛流場明顯時，系集預報結果將呈現一致性，系集預報路徑分布亦縮小。

4.2 綜合統計分析

依據前節討論結果，可以發現系集預報結果相當複雜，為取得路徑預報的一致性，吾人依據 JTWC 最佳路徑作為比對之基準，嘗試找出路徑誤差最小之降水物理過程參數法組合，並找出最佳的系集預報組合。

4.2.1 最佳參數法組合

在實驗中針對第 24、48、72 及 96 小時辛樂克及薔蜜颱風各降水物理過程參數法組合進行統計，出現最小誤差次數之最多者為最佳組合。表 4.1 中，次數最高者以綠色示之、次者以黃色示之、再次者以紅色示之。

在辛樂克颱風的統計中，總個案數為 72 個，run13 即佔了 24 次，其相對百分比為 33%；薔蜜颱風總個案數為 30 個，run13 亦佔了 11 次，其相對百分比為 37%；合計兩個颱風總個案數 102 個，run13 共佔了 35 次，相對百分比為 34%，為所有降水物理過程組合中名列第一。

因此，根據統計結果顯示，當選擇 Kain-Fritsch 積雲參數法及 WSM3 微物理參數法時，可以獲得最小平均路徑誤差，作為最佳參數法之組合。

4.2.2 最佳系集預報組合

本研究中分別計算 ensm16、ensm08 及 ensm04 等系集平均路徑，與世界主要之全球預報模式 JMA、UK、NCEP、EC 等以及上述四家主要全球預報模式之

平均路徑(JUNE)進行比較。

系集平均路徑 ensm16 是由所有 16 種不同降水物理過程所產生的預報路徑平均而成；ensm08 則是選擇較接近 ensm16 的 8 條路徑平均結果，希望可以藉由縮小路徑分布得到較佳的預報結果；ensm04 則是由表 4.1 中發現，將積雲參數法固定於 Kain-Fritsch 時的 4 個組合(run11~run16)多為前三名，因此選用為平均路徑以期得到較佳系集預報組合。

圖 4.31(a)~(u)及圖 4.32(a)~(i)分別為辛樂克颱風及薔蜜颱風各系集平均路徑及全球預報模式之預報結果。為求一致及後續統計，最大預報時數為 72 小時，除部分全球預報模式少於 72 小時預報或未提供該時段預報外，大致可見各系集平均路徑均可提供如全球預報模式之預報結果。

圖 4.33 為辛樂克颱風實驗期間之平均誤差直方圖，並與其他各全球預報模式比較，可以發現 ensm16 及 ensm08 有較大之平均誤差，尤以 ensm08 誤差最大，並未如預期希望透過縮小路徑分布而達到誤差減少之效果。而 ensm04 在表現上，第 24 及 48 小時之預報與 EC、UK 及 JMA 結果相近，雖然第 72 小時預報略差，但整體而言已具有相當的預報水準。而整體來說，NCEP 及 JUNE 在辛樂克颱風個案中提供較佳的路徑預報。

圖 4.34 為薔蜜颱風實驗期間各系集平均路徑及各全球預報模式之平均誤差直方圖，圖中可見 ensm16 及 ensm08 在第 72 小時仍有較大的預報誤差；EC 亦超過 400 公里之誤差。而 ensm04 的預報結果與各全球預報模式比較雖各有優劣，但整體而言在薔蜜颱風實驗中表現較佳；第 72 小時之平均誤差亦優於 JUNE。

總結兩個颱風實驗之平均路徑誤差，圖 4.35 可見 ensm16 及 ensm08 在預報上平均路徑誤差較大；ensm04 與各全球預報模式具有相近之預報水準，在預報上可有其參考價值；而 JUNE 的預報在實驗中呈現最小平均路徑誤差之預報，可見系集預報之價值。

4.2.3 T-test 統計檢定

本研究藉由 T-test 統計檢定來比較任兩組平均路徑誤差是否具有統計上的差異，檢定中假設路徑誤差為常態分布，並定義當 T-test 計算之 P 值(機率值)小於 0.1 時，即可視為兩組平均路徑誤差有統計上的差異(相當於 90%的統計信心度)。

圖 4.36 為 JMA 與 ensm04 的比較結果，平均路徑誤差相差甚小，T-test 統計檢定在 24、48 及 72 小時 P 值分別為 0.411、0.293 及 0.387，並未通過統計檢定，可見在平均誤差表現上無明顯之差異。

圖 4.37 為 UK 與 ensm04 的比較結果，T-test 統計檢定在 24、48 及 72 小時 P 值分別為 0.089、0.059 及 0.324，可見在第 24 及 48 小時之預報具有顯著差異，而第 72 小時則無明顯差異，但整體而言 ensm04 平均路徑誤差表現優於 UK。

圖 4.38 為 NCEP 與 ensm04 的比較結果，T-test 統計檢定在 24、48 及 72 小時 P 值分別為 0.406、0.116 及 0.058，可見在第 48 及 72 小時略具有或具有差異，且 NCEP 預報結果優於 ensm04；而在第 24 小時則無明顯差異。

圖 4.39 為 EC 與 ensm04 的比較結果，T-test 統計檢定在 24、48 及 72 小時 P 值分別為 0.413、0.497 及 0.370，並未通過統計檢定，因此，EC 與 ensm04 在平均誤差表現上無明顯差異。

圖 4.40 為 JUNE 與 ensm04 的比較結果，T-test 統計檢定在 24、48 及 72 小時 P 值分別為 0.003、0.003 及 0.042，均通過統計檢定，具有顯著差異，可見 JUNE 在預報上優於 ensm04。

總結上述可以得知，實驗中系集平均路徑 ensm04 的預報優於全球預報模式 UK，與 JMA 及 EC 的預報能力相當，雖預報能力略低於 NCEP，但整體而言仍可與全球預報模式具有相當之預報能力。另外，JUNE 的預報能力在實驗中表現最佳，再次驗證系集預報之價值。

4.3 不同降水物理過程參數法對強度與路徑之探討

本節針對辛樂克颱風 9 月 9 日 0000 UTC、1200 UTC 以及蕃蜜颱風 9 月 24 日 1200 UTC、25 日 0000 UTC 這四個時間點來討論不同降水物理過程參數法對於強度及路徑之探討。

圖 4.41 為辛樂克颱風 9 月 9 日 0000 UTC 固定積雲參數法後，改變微物理參數法之颱風中心氣壓隨時間變化。圖中 J 為 JTWC 最佳颱風路徑所公布之中心氣壓值，雖然模擬之颱風增強速度較慢，但可以發現圖 4.41(a)之積雲參數法固定於 Kain-Fritsch(後以(a)代替)時，颱風中心海平面氣壓有較快的下降趨勢，並可出現較小之氣壓值；圖 4.41(b)與(d)則分別固定 Betts-Miller-Janjic(後以(b)代替)及 New-Grell(後以(d)代替)參數法，均表現緩慢增強的趨勢；而圖 4.41(c)則固定 Grell-Devenyi(後以(c)代替)參數法，為增強趨勢最慢且有偏弱之情形。圖 4.42 為辛樂克颱風 9 月 9 日 0000 UTC 固定積雲參數法後，改變微物理參數法之路徑圖，由於辛樂克颱風處於鞍形場移速較慢，且移動方向朝北，較難區分參數法對路徑之影響，但若以路徑曲折而言，(b)圖(c)及(d)皆出現打轉之現象，表示颱風移動過程中具有向西的移動向量；而(a)則可以發現大致上均朝向北方移動且不具有明顯之打轉。另外，若以固定微物理參數法為 Kessler 參數法時(即 run11、run21、run31 及 run51)，可以發現預報路徑較其他組合有偏東移動的趨勢。

圖 4.43 為辛樂克颱風 9 月 9 日 1200 UTC 固定積雲參數法後，改變微物理參數法之颱風中心氣壓隨時間變化。可以發現(a)及(d)的預報皆有機會模擬出較強的颱風，但增強速度仍以(a)較快；(c)則是增強最慢且模擬偏弱。圖 4.44 為辛樂克颱風 9 月 9 日 1200 UTC 固定積雲參數法後，改變微物理參數法之路徑圖。可以發現(a)及(b)皆出現一致北移的預報，但(b)移向略偏東側；(c)及(d)則出現部分偏西移動的預報。當固定微物理參數法為 Kessler 參數法時，(c)及(d)圖可明顯看見易偏東移動。

圖 4.45 為蕃蜜颱風 9 月 24 日 1200 UTC 固定積雲參數法後，改變微物理參

數法之颱風中心氣壓隨時間變化。與前述相同，(a)仍為增強最快且可模擬出較強之颱風強度，(b)、(c)及(d)則為緩慢增強且強度偏弱。圖 4.46 為蕃蜜颱風 9 月 24 日 1200 UTC 固定積雲參數法後，改變微物理參數法之路徑圖。可以看見(a)為較一致的預報結果，大致朝向北方移動且移速較快；(b)、(c)及(d)則多為移速緩慢，且具有範圍較大的路徑分布，移動方向多為偏西。當固定微物理參數法為 Kessler 參數法時，則可以明顯看出易向東偏的預報。

圖 4.47 及圖 4.48 分別為蕃蜜颱風 9 月 25 日 0000 UTC 固定積雲參數法後，改變微物理參數法之颱風中心氣壓隨時間變化及路徑圖，與圖 4.45 及圖 4.46 有相同的發現。

圖 4.49 至圖 4.52 為各實驗模擬第 72 小時之軸對稱平均地表 10 公尺切向風場隨颱風中心距離之分佈圖，分別為辛樂克颱風 9 月 9 日 0000 UTC 及 1200 UTC 和蕃蜜颱風 9 月 24 日 1200 UTC 及 25 日 0000 UTC。與圖 4.41 至圖 4.48 的排序相同，皆固定積雲參數法後改變微物理參數法。其結果顯示，當積雲參數法固定於 Kain-Fritsch 參數法時，大致可獲得最大強度之模擬；而微物理參數法固定於 Kessler 參數法時(即各圖綠線)，可以看見此暖雲過程可獲得較大的眼牆範圍，但強度而言大致上較其他含有冷雲過程參數法弱。

圖 4.53(a)為辛樂克颱風 9 月 9 日 0000 UTC 初始分析場海平面氣壓圖，(b)與(c)分別為 run13 模擬第 72 小時海平面氣壓圖及 run51 模擬第 72 小時海平面氣壓圖，作為積雲參數法使用 Kain-Fritsch 參數法明顯偏北及微物理參數法使用 Kessler 參數法明顯偏東之代表。(d)~(f)與(a)~(c)相同，但時間為 9 月 9 日 1200 UTC。由圖中可以發現在 run13 組合下，模擬之颱風較強，且環境流場中太平洋高壓較強(見(b)及(e))，使得模擬之颱風易向北移；而在 run51 組合下，模擬颱風較弱，且易受日本東南方低壓牽引，加上環境流場太平洋高壓偏弱，因此模擬之颱風易向東偏(見(c)及(f))。

圖 4.54 則與圖 4.53 相同，但為蕃蜜颱風 9 月 24 日 1200 UTC 及 25 日 0000

UTC。由圖中可以發現與圖 4.53 有相同之結果，即 run13 可模擬出較強的颱風強度，環境流場有較強的太平洋高壓導引(見(b)及(e))，且南海低壓亦受參數法影響呈現較強的模擬，使得颱風易向北且西移；而在 run51 組合下，模擬之颱風亦為偏弱，且環境流場的太平洋高壓較弱而南海低壓受參數法影響模擬結果亦較弱，因此模擬之颱風易偏東移。

總結上述可知，區域模式解析度在 15 公里時，積雲參數法使用 Kain-Fritsch 參數法進行颱風模擬時，可以有效且快速加強颱風之強度，且移動方向有偏北之趨勢，移動速度也較快；當固定微物理參數法為暖雲過程時，即 Kessler 參數法，可能導致預報路徑有偏東的趨勢。造成此結果可能與降水物理參數法組合導致模擬之颱風強度、結構與環境流場產生變化有關，且在積雲參數法使用 Kain-Fritsch 參數法時，可能模擬出較強的太平洋高壓；而微物理參數法使用 Kessler 參數法時，可能模擬出較弱的太平洋高壓。

本研究與 Yang et al. (2005) 之差異在於其最小網格解析度為 6.67 公里，故關閉此網格積雲參數法對模擬颱風之影響，發現 Warm Rain(即 Kessler 參數法)組合針對桃芝颱風(2001)模擬呈現向西北移動，且可模擬出較強之強度。而本研究與 Fovell et al. (2009) 之探討差異在於其最小網格解析度為 3 公里，同樣關閉積雲參數法對模擬颱風之影響，僅著重討論微物理參數法與路徑之關係；此外，其模式架構為不考慮環境流場之理想模式。他們的研究結果顯示 Kessler 參數法會呈現快速向西北移動，進一步的分析顯示模式使用 Kessler 參數法時會讓颱風大小擴大，可以讓模式中的渦旋產生更大的 beta-effect，進而導致颱風快速往西北運動。而本研究則非理想模式，因此降水物理參數法對於颱風路徑之模擬較為複雜，但可以發現，降水物理參數法對於環境流場及颱風本身結構具有影響，進而使颱風路徑出現變化。本節討論中亦可發現，在解析度 15 公里之區域模式，積雲參數法在路徑及強度中可能扮演較關鍵的角色。

4.4 小結

本章主要針對 16 組不同降水物理過程參數法組合產生的系集預報作討論，並使用統計方法找出最佳降水物理過程參數法組合及最佳系集預報組合。

實驗結果指出，當使用 16 種不同降水物理過程參數法組合可以得到系集預報路徑的分布，此分布所及範圍與中央氣象局所發布之颱風路徑潛勢預測相似，可顯示颱風未來可能侵襲的範圍，對於警戒及防災具有參考價值；當模擬之颱風登陸時，系集路徑預報會因為模擬之颱風強度減弱而無法提供長時間預報，而颱風強度減弱除地形影響外，也可能與降水物理過程組合有關；另外，環境駛流場明顯時，系集預報結果將呈現一致性且路徑分布縮小。

透過統計方法檢視，發現當選擇 Kain-Fritsch 積雲參數法及 WSM3 微物理參數法作為組合時，可以獲得最小平均路徑誤差，是為相對較佳參數法組合；而當積雲參數法固定於 Kain-Fritsch 參數法時，其四組參數法組合所產生的平均系集路徑 ensm04 可以產生與世界主要全球預報模式相近的預報。由 T-test 統計檢定可以得知，系集平均路徑 ensm04 優於全球預報模式 UK，而與 JMA 及 EC 的預報能力相當，雖預報能力略低於 NCEP，但整體而言仍具有相當之預報能力。另外，在本實驗中四家主要全球預報模式平均(JUNE)結果，可達到最佳預報結果，再次驗證系集預報之價值。

而在區域模式解析度在 15 公里時，積雲參數法使用 Kain-Fritsch 參數法可有效且快速加強颱風之強度，並容易偏北移動且移動速度較快；當固定微物理參數法為 Kessler 參數法時，可能導致預報路徑易偏東移動。此結果可能與降水物理參數法對於環境流場及颱風本身結構具有影響，進而使颱風路徑出現變化。