



香港天文台

HONG KONG OBSERVATORY

Reprint 1226

按天氣情境修正數值預報模式的低溫預報

何俊傑

第30屆粵港澳氣象科技研討會

廣東省廣州市

2016年4月20-22日

按天氣情境修正數值預報模式的低溫預報

何俊傑
香港天文台

摘要

近年，數值預報模式是預報每日最低氣溫的重要參考工具，然而數值預報模式往往出現系統性的誤差。利用過去數年的實測資料作比對，數值模式的低溫預報在不同天氣情境下，例如有或無降雨的季風潮、增強或緩和的季風等，其預報的系統性誤差會有所分別，而誤差亦會隨預報時效而變化。本文簡介一個綜合不同數值預報模式，並根據天氣情境及預報時效來修正上述誤差的氣溫預報工具。交叉驗證結果顯示，該工具在較長的預報時效，即第三至九天的表現較現有的多模式客觀集成預報系統略佳，其技巧在降雨的情境尤為顯著。

1. 引言

隨著數值預報模式近年在模擬物理過程、分辨率及資料同化等方面得到改進，近年其準確度已逐步提升。天文台在 2011 年底發展「客觀集成預報」(Objective Consensus Forecast；下稱 OCF)系統 (陳世倜及李子維，2013)，現提供未來九天香港不同站點的氣溫、濕度和風速等的預報。該系統先利用實況觀測數據，以卡爾曼濾波後處理技巧對多個全球預報模式及天文台中尺度模式的直接輸出作出修正，再按照各模式在過去三十天的表現訂定其比重，製成集成預報。目前，OCF 的結果已成為預報員制定每日氣溫預測的主要客觀參考數據之一。雖然卡爾曼濾波能夠因應模式誤差在過去一段時間的變化而調節其修正幅度，但在天氣情境急速變化之際，或未能及時掌握模式誤差可能出現的轉變 (Monache *et al.*, 2011)。

秋冬兩季，華南沿岸地區不時受到東北季風潮影響。季風潮可根據它們在抵達時是否帶來降雨，以及抵達後雨勢是否持續，分為「乾潮」、「濕潮」、「濕轉乾潮」(李國麟及陳積祥，1996)。過去季風潮個案分析顯示，數值模式在有降雨的「濕潮」情境下，往往低估因蒸發冷卻導致的降溫幅度，因而出現明顯的暖偏差 (唐宇輝等，2009)。因此，在參考「客觀集成預報」的同時，預報員往往根據經驗及最新實況觀測數據，評估在預計會出現的天氣情境下，經後處理的數值模式預報是否需要再作調整，從而作出氣溫預測，並向公眾發佈。

本文探討過去數年主要數值預報模式直接輸出的秋冬季低溫預報的系統誤差在不同天氣情境下如何隨預報時效變化，並介紹一個基於這些結果修正模式直接輸出的低溫預報工具，名為「情境綜合氣溫預報」(Scenario Temperature Integrated Forecast；下稱 STIF)，供預報員參考。

2. 數據及研究方法

2.1 天氣情境分類

本文利用天文台總部每日錄得的最低氣溫、雨量、上午 8 時的海平面氣壓、京士柏氣象站錄得的日照時間，以及打鼓嶺的最低氣溫 (圖一顯示各站位置)，把 2012 年 11 月至 2015 年 4 月期間天文台總部最低氣溫在 17.0 度或以下的日子 (合共 256 日的「訓練期」)，分為六種天氣情境。分類方法大致如下 (圖二)：

- (1) 先根據當天海平面氣壓與前一天的變化，分為「季風潮」和「季風緩和」兩大類；
- (2) 在「季風潮」的日子，視乎當天及前一天的雨量，再細分為三種情境：如當天及前一天均無降雨，當天屬「乾潮」；如當天有顯著降雨 (雨量達 0.1 毫米或以上)，或有微量雨量而日照時間少於 1 小時，屬「濕潮」；如前一天有降雨，而當天無降雨，或當天只有微量雨量但有 1 小時或以上的日照時間，則當天屬「濕轉乾潮」；
- (3) 在「乾潮」和「濕轉乾潮」的日子，若天文台總部及打鼓嶺最低氣溫相差達 4.0 度或以上，當天則屬「輻射冷卻」情境¹；
- (4) 最後，視乎當天有否降雨，將「季風緩和」細分為「季風緩和 (濕)」和「季風緩

¹ 天文台總部及打鼓嶺分別位於香港的市區及新界內陸地區。當出現雲量偏少、風勢輕微等有利輻射冷卻的條件，兩者的溫差一般較大。

和（乾）」兩種情境。

分類結果顯示，有降雨和無降雨的情境日數約各佔一半。

2.2 數值模式的低溫預報

本文共使用四個全球數值模式起始時間為 12UTC 的直接輸出，包括歐洲中期天氣預報中心(ECMWF)、日本氣象廳(JMA)、美國國家海洋及大氣管理局(NCEP)，以及歐洲中期天氣預報中心集成預報系統(ECEPS)的集成平均。各模式對天文台總部的每日最低氣溫的預報是將最接近天文台總部的四個網格點的數值以線性插值法計算出來。

本文計算訓練期內每日各個模式在一天前至十天²前 12UTC 起始運算的最低氣溫預報的誤差。由於預報員在每天早上製作天氣預報時，最新可供參考的全球模式預報起始時間一般為前一天的 12UTC，為方便討論，下文會將該起始時間針對當天的預報稱為預報時效「第零天」的預報；針對翌日的預報稱為預報時效「第一天」的預報，如此類推。

2.3 STIF 的建立

STIF 的目的是提供未來九天每天在不同天氣情境下的最低氣溫預報。預報員在判斷某一天最有可能出現的天氣情境後，可選取有關情境的 STIF 預報作參考。本文將檢視下列兩種 STIF 運算方式（下稱 STIF1 及 STIF2）的預報表現，兩者的分別主要在於前者主要修正模式在不同天氣情境及預報時效的誤差，而後者同時考慮模式的初始誤差，詳情如下：

STIF1: 先按照在訓練期內個別模式在各天氣情境及預報時效的平均誤差(系統誤差)，將各個模式的直接輸出預報分別逐一修正，然後再根據不同模式在訓練期內的表現作加權平均，得出逐天的低溫預報。假設模式*i*在預報時效第*d*日的直接輸出為 T_d^i ，而它們在某個天氣情境於訓練期的系統誤差為 α_d^i ，STIF1 針對該情境的預報(S_d)為

$$S_d = \sum_i w_d^i (T_d^i - \alpha_d^i)。$$

其中*w*代表各模式加權因子，與該模式經修正後的預報在訓練期內的平均絕對誤差成反比。

STIF2: 在訓練期內，先將各模式在第零天直至上午 8 時的最低氣溫預測與實況(X_0)相比³，得出並修正「初始誤差」，然後才計算系統誤差(β_d^i)。STIF2 的預報亦同樣地分別修正各模式直接輸出的初始誤差及系統誤差，再利用與 STIF1 相同的方法加權處理：

$$S_d = \sum_i w_d^i (T_d^i - (T_0^i - X_0) - \beta_d^i)。$$

表一列出 STIF 與 OCF 的主要分別。本文將比較 STIF1、STIF2、模式預測及每天

² 天文台在 2015 年前業務上只參考 NCEP 模式七天以內的預報，因此本文只考慮該模式一天前至七天前 12UTC 的起始運算（即預報時效零至六天）。

³ 在業務運作上，預報員會在每天早上參考最新數值模式預報和其他客觀指引，因此初始誤差的計算只考慮直至上午 8 時的實況。

早上由預報員發出的九天天氣預報（下稱「九天預報」）的表現。

3. 數值模式預報的系統性誤差

圖三以箱型圖顯示訓練期內所有日子（不論情境）四個數值模式直接輸出低溫預報的誤差在不同預報時效的分布。由於預報時效越長，預報不確定性越大，各模式的誤差變得較為分散，至第九天四分位距普遍超過 2 度。此外，誤差的中位數隨預報時效增加，偏向正數，顯示模式的預報在較長預報時效傾向出現暖偏差，情況以 NCEP 為甚（圖三(c)）。

圖四則比較六種不同天氣情境下各模式誤差的變化。總的來說，在無降雨的情境（例如「乾潮」、「輻射冷卻」及「季風緩和（乾）」）下，模式誤差的分布較有降雨的情境（包括「濕潮」和「季風緩和（濕）」）集中，這可能與各模式對雨勢發展和相關降溫的掌握能力較低有關。兩者誤差的傾向亦有所分別，在「乾潮」及「輻射冷卻」兩種情境，除 NCEP 之外，各模式在較短至中期的預報時效（約一至五天）多出現輕微的冷偏差（誤差中位數介乎零至負 1 度），而在較長的預報時效（約七至九天）則多轉為出現輕微的暖偏差。而在「濕潮」和「季風緩和（濕）」的情境，暖偏差通常較早出現（預報時效約第三天），幅度亦比無降雨的情境大。這在「濕潮」情境特別明顯，在較長預報時效的暖偏差平均達 2 度或以上。

各模式除了多低估數天後出現的季風潮所帶來的降溫外，它們在兩種「季風緩和」的情境，亦在較長的預報時效出現暖偏差的情況，反映模式可能高估此情況下，例如由源自華東陸地的東風轉至源自海洋的東風期間氣溫回升的速度。值得注意的是，ECEPS 的誤差中位數在較長的預報時效仍接近零度，表現比其他模式理想。

4. STIF 交叉驗證

本文以交叉驗證方式檢視第 2.3 部分所述兩種 STIF 運算方式的表現，方法如下：

- (1) 針對訓練期內某日，計算除了當天及其前十天以外，各模式在訓練期內其他出現相同天氣情境的日子的系統誤差；
- (2) 假設 STIF 使用者能正確選擇當天的天氣情境，利用步驟(1)計算出的誤差，得出一至九天前 STIF 針對當天的預報；
- (3) 就訓練期內其他各日，重覆步驟(1)及(2)；
- (4) 計算在訓練期內所有日子，以及不同情境下，STIF 預報的均方根誤差。

圖五(a)顯示所有日子（不論情境）兩種 STIF 運算模式、OCF、較眾模式直接輸出的表現理想的 ECEPS 及九天預報⁴在不同預報時效的均方根誤差。STIF1（紅線）表現在較短的預報時效（一天）比 OCF（藍線）及九天預報（橙線）稍為遜色，但由第三天開始表現開始較 OCF 優勝，而整體而言中至較長期的表現亦與九天預報相若。至於同時修正初始誤差的 STIF2（紫線），第一天的預報表現與 OCF 接近，並比 STIF1 略佳，但在中期至較長的預報時效，雖然比 OCF 略佳，誤差卻較 STIF1 大。這反映初始誤差的修正（STIF2）只在較短預報時效的效果較明顯。

⁴ 天文台於 2014 年 4 月將天氣預報由七天擴展至九天，因此預報時效第八及第九天樣本數目較少。

六種天氣情境中，OCF 在「乾潮」下的表現最好，即使在較長的預報時效，STIF1 相比之下亦未見有明顯優勢（圖五(b)）。不過在「濕潮」和「濕轉乾潮」（圖五(c)、(d)）兩種情境，STIF1 的表現由第三、四天起明顯較 OCF 佳，兩者誤差的差距逐日擴闊，而 STIF1 的表現甚至比 ECEPS（綠線）及九天預報略為優勝。至於在季風緩和的情境（圖五(f)、(g)），雖然 STIF1 相對於 OCF 的優勢不如「濕潮」般明顯，但在中期的表現能夠與九天預報相若。如將 STIF1 與 STIF2 兩者比較，在大多數情境中，後者的表現普遍在預報時效第一、二天略佳，其餘各天則較遜色。

基於上述結果，考慮到同時修正模式初始誤差及系統誤差對較短預報時效的低溫預報表現有幫助，現時業務試行的 STIF 除提供以 STIF1 運算方式的預報外，亦同時提供 STIF2 的第一至三天預報供預報員參考。

5. 個案討論：2016 年 1 月下旬的強烈寒潮

2016 年 1 月下旬，一股強烈寒潮席捲華南，並帶來嚴寒天氣，沿岸廣泛地區包括香港，出現罕見的低溫及冬季降水現象。這股寒潮在 1 月 22 日抵達廣東沿岸時是伴隨強風的濕潮。「陰雨」天氣在 1 月 23 日及 1 月 24 日大部分時間持續，這兩天天文台總部的氣溫分別降至最低 7.1 度及 3.1 度，後者更是自 1957 年以來的日最低氣溫。1 月 25 日本港雨勢減弱，天色轉晴，天文台錄得比前一天稍高的 4.3 度最低氣溫。本部分以此個案作例子，說明 STIF 的參考價值。

圖六比較 OCF 及 STIF 對於 1 月 23 至 25 日的低溫預報。OCF 在今次寒潮明顯高估低溫，在較長的預報時效（約七至九天）暖偏差普遍達到 4 度或以上，原因除了當時部分模式低估寒潮強度之外，亦由於寒潮前數星期各主要全球模式持續出現顯著冷偏差，令 OCF 將之後的模式氣溫預報朝著暖的方向作出調整。即使隨著預報時效縮短，OCF 逐步下調低溫預報，令其更貼近實況，但對於 23 及 24 兩日濕潮情況下出現的氣溫仍有相當的暖偏差。

相反，沒有修正初始誤差的 STIF1，整體表現明顯較佳。對於 23 及 25 兩日，七至九天前 STIF1 預報的低溫與實況相差在 2 度以內。即使選擇其他情境，預報亦比 OCF 接近實況，反映 STIF 能有效修正與預報時效相關的誤差。這與本文第 4 部分提到 STIF1 在較長預報時效表現較理想的觀察吻合。不過，STIF1 對於 24 日持續降水期間出現的最低氣溫仍有一定的暖偏差。而在較短期的預報方面，OCF 與 STIF1 的誤差比較接近，前者對 25 日的低溫估算表現較佳。

引入修正初始誤差的 STIF2，在這個個案的整體表現未能夠比 STIF1 優勝，對於 23 日的第二天預報，誤差甚至比 STIF1 大。這與再之前於 21 日影響本港的另一股季候風較預期強，而令模式針對 21 日的預報出現較大的暖偏差有關。由於 STIF2 在修正初始誤差時只考慮各模式在預報時效第零天的表現，STIF2 可能會「過分修正」。至於針對 25 日的第一天預報，STIF2 亦有類似過分低估低溫的情況，這是由於模式未能掌握 24 日因持續降水造成的降溫，而同樣出現較大的暖偏差。

綜合第 4 部分的交叉驗證結果及上述個案示例，STIF 對於預報數天至一個星期後出現的季風潮，尤其是濕潮所帶來的降溫，有一定的參考價值。而在較短的預報時效，初始誤差的影響較大，由於 OCF 修正有關誤差時能考慮過去一段時間模式的表現，其

預報較只基於模式在預報時效第零天的誤差而作修正的 STIF2 穩定。預報員在參考 STIF 及 OCF 預報時，應考慮它們在不同預報時效相對優勢之處；在短期預報方面，亦須留意初始誤差修正的影響。

值得一提的是，這次寒潮個案出現的罕見低溫，遠低於用作建立 STIF 各參數的訓練期內所出現的氣溫範圍。因此，STIF 預報極端低溫的應用價值仍有待進一步研究。

6. 總結

雖然近年數值模式的秋冬季低溫預報已愈見可靠，但它們的誤差在不同情況下可出現變化，為建立和應用相關客觀指引帶來挑戰。本文檢視過去數年各主要模式在不同天氣情境及預報時效的誤差。結果顯示模式的直接輸出低溫預報多隨著預報時效增加而出現系統性暖偏差，而偏差在有降雨的情境尤為明顯。

本文亦介紹一個嘗試修正上述誤差的預報工具「情境綜合氣溫預報」(STIF)，為預報員在現時常用、透過卡爾曼濾波作後處理的多模式「客觀集成預報」(OCF)以外提供多一項客觀指引。交叉驗證結果顯示，STIF 的預報表現在預報時效三天或以上整體上較 OCF 略佳，亦與預報員發出的九天天氣預報相若。而在有降雨的情境下，STIF 的優勢更為明顯，對預報員有一定的參考價值。而在 2016 年 1 月下旬影響華南的強烈寒潮，STIF 亦大致能夠在數天前顯示香港會出現嚴寒天氣。

儘管如此，STIF 仍有改善的空間。第一，在較短的預報時效（約一至兩天），模式初始誤差相對其他系統誤差較為重要。由於 STIF 現時只考慮各模式在單一日的誤差而作出修正，如果模式的誤差因某些天氣情況（例如持續降雨造成的跌溫）出現短暫的變化，STIF 的預測可能因此受到影響。第二，STIF 針對天氣情境和預報時效作出的誤差修正是基於模式在一段指定訓練期內的表現。由於數值模式本身會不時更新，未來這些系統誤差不一定與過去相同。所以將來 STIF 的發展可考慮引入其他修正初始誤差的方法，使短期預報的表現更穩定，同時亦需要定期檢視模式系統誤差的變化，並作出更新。

鳴謝

作者感謝李立信先生及黃偉健先生對本文及相關研究工作提供寶貴意見，並感謝譚綺婷女士及梁康偉先生發展 STIF 工具的應用程式。

參考文獻

- [1] 李國麟，陳積祥，1996：乾與濕東北季風寒潮的相關天氣形勢，第十一次粵港澳重要天氣研討會，廣州，1996年12月17-19日
- [2] 陳世倜、李子維，2013：客觀集成預報 - 香港天文台的定點多模式集成預報系統，第二十七屆粵港澳氣象科技研討會，廣東韶關，2013年1月9-10日
- [3] 唐宇輝、李月嬋、陳世倜，2009：2008年初華南沿岸地區持續寒冷的天氣分析和預報技巧，第二十三屆粵港澳氣象科技研討會，澳門，2009年2月18-20日
- [4] Monache L.D., Nipen T., Liu Y., Roux G., Stull R., 2011: Kalman filter and analog schemes to postprocess numerical weather predictions, *Monthly Weather Review*, **139**, 3554-3570

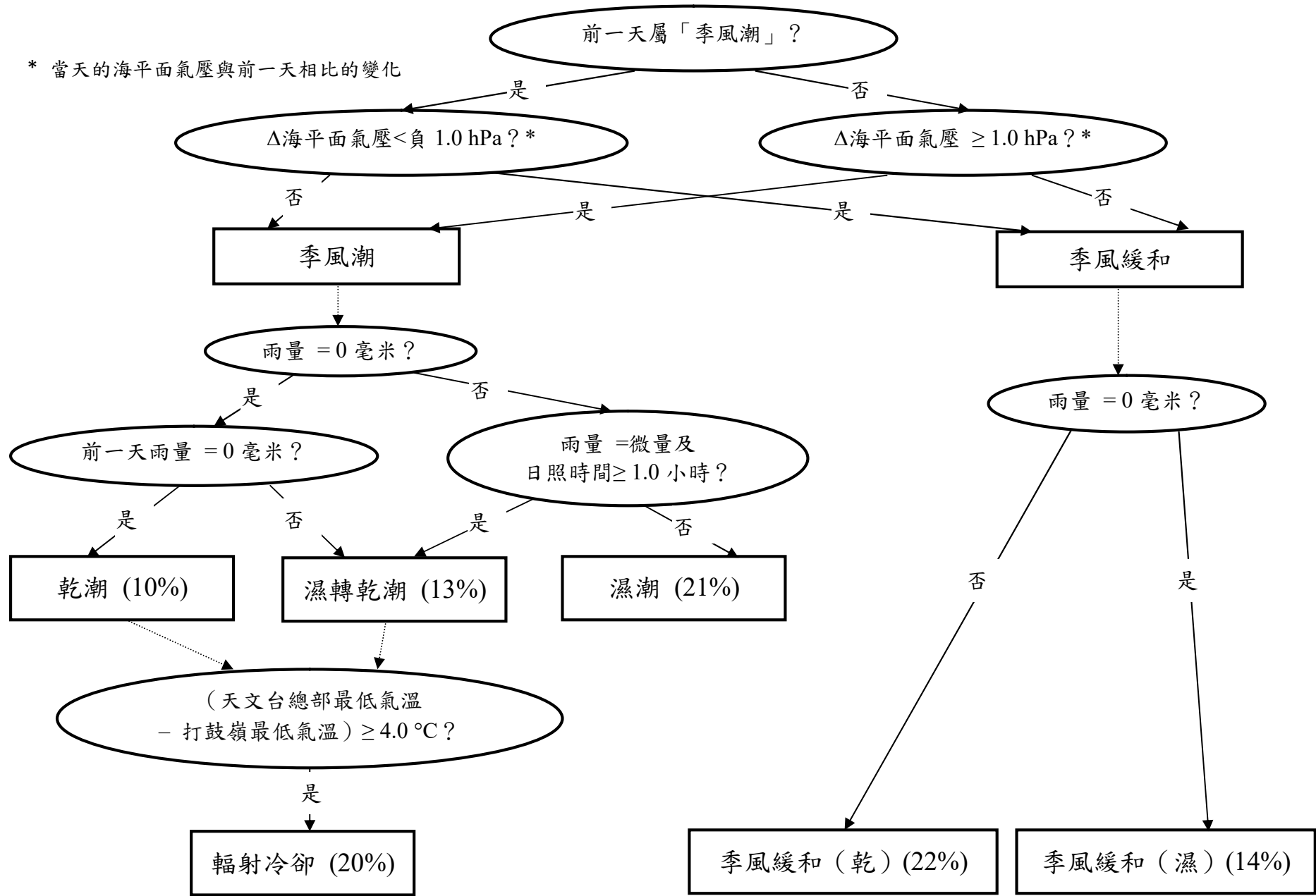
表一 「情境綜合氣溫預報」(STIF)及「客觀集成預報」(OCF)的主要分別

	STIF	OCF
包括的數值 模式	ECMWF、JMA、NCEP、 ECEPS (集成平均)	ECMWF、JMA、NCEP、ECEPS (集成平均)、HKO Meso-NHM
後處理技巧	各模式被分別修正 (1) 天氣情境及預報時效的系統 誤差修正(適用於STIF1及 STIF2): 根據模式在訓練期(2012 年11月至2015年4月) 內的平均誤差計算 (2) 初始誤差修正(只適用於 STIF2): 根據模式在預報時效第零 天的誤差	因應各模式在過去30天誤差的 變化,以卡爾曼濾波作出修正
模式加權	根據各模式在訓練期內的表 現釐定	根據各模式在過去30天的表現 釐定

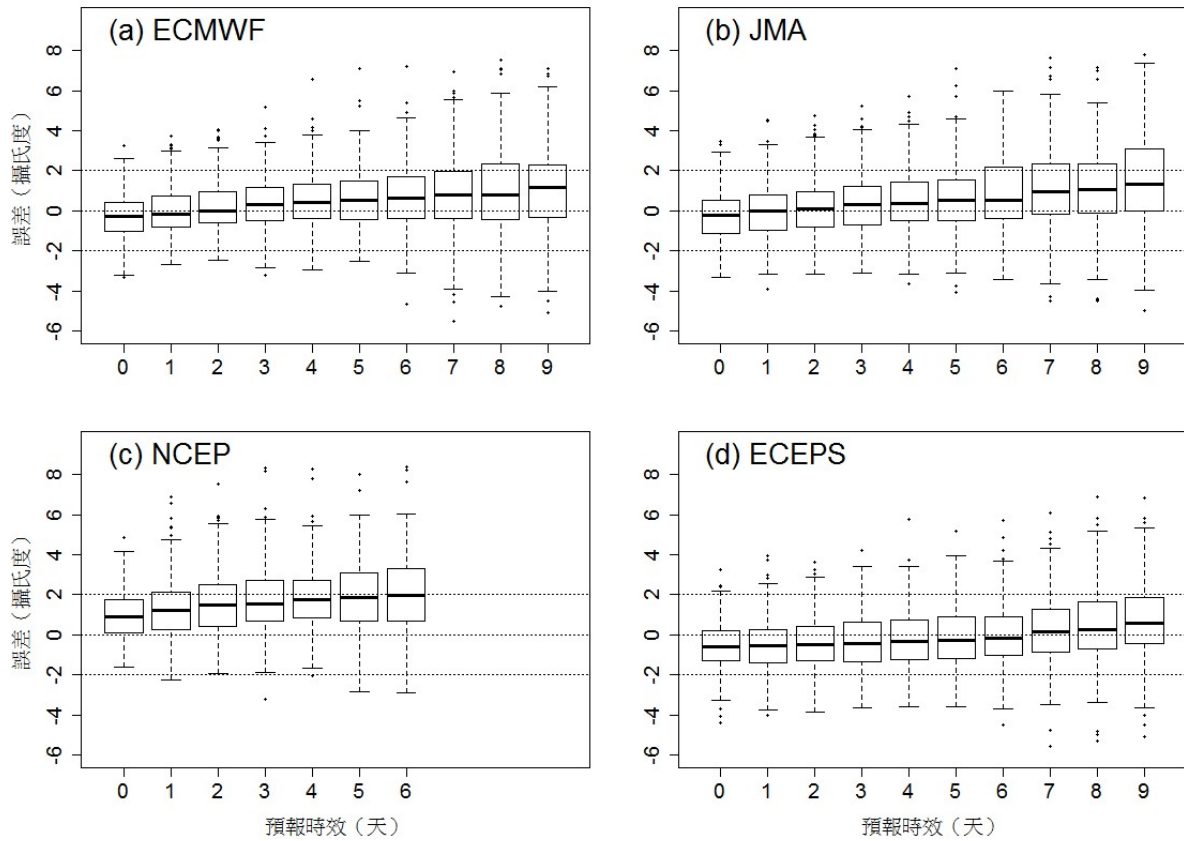
(註) ECMWF: 歐洲中期天氣預報中心; JMA: 日本氣象廳; NCEP: 美國國家海洋及大氣管理局; ECEPS: 歐洲中期天氣預報中心集成預報系統; HKO Meso-NHM: 香港天文台中尺度模式



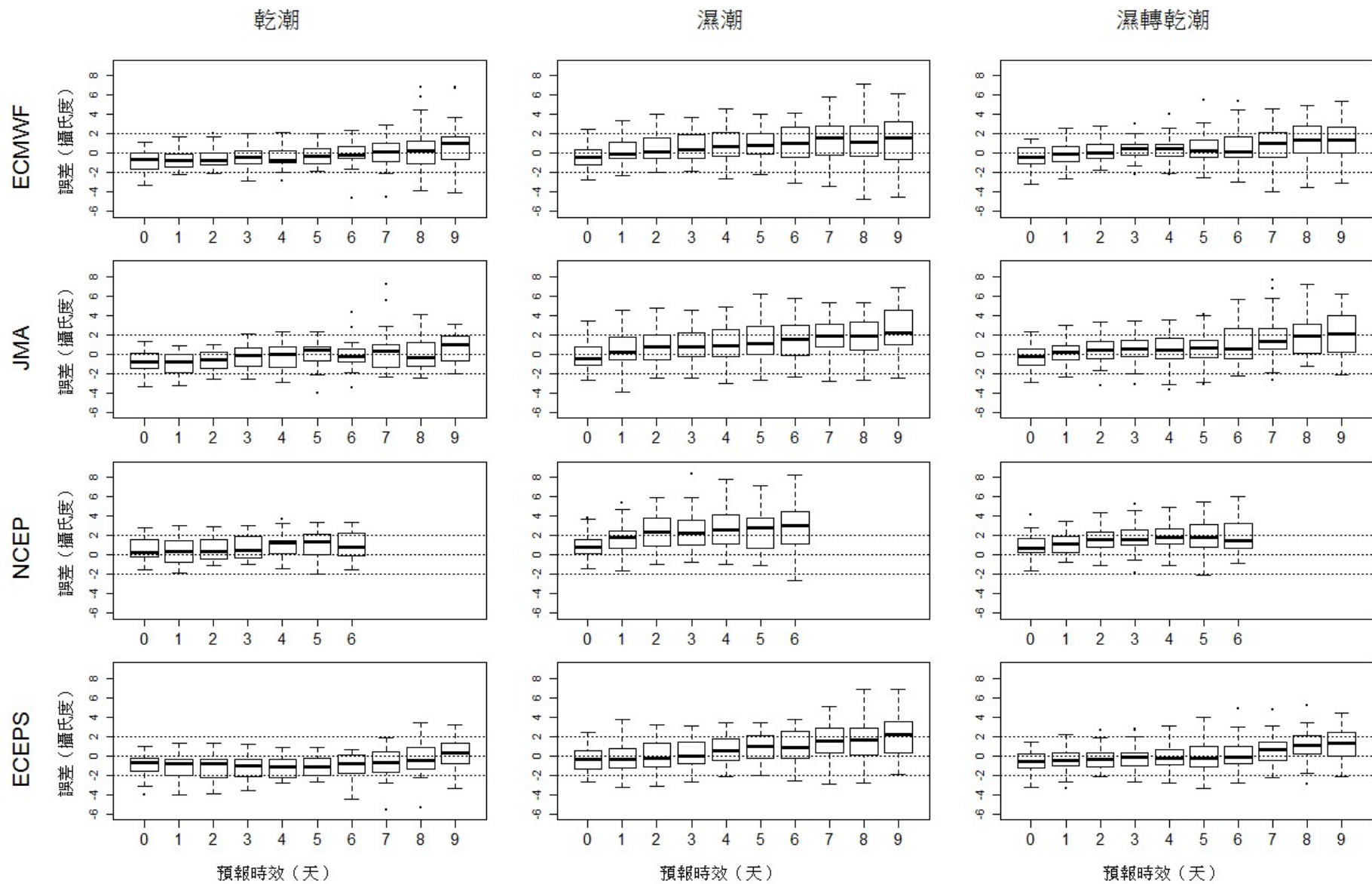
圖一 文中提及各氣象站的位置



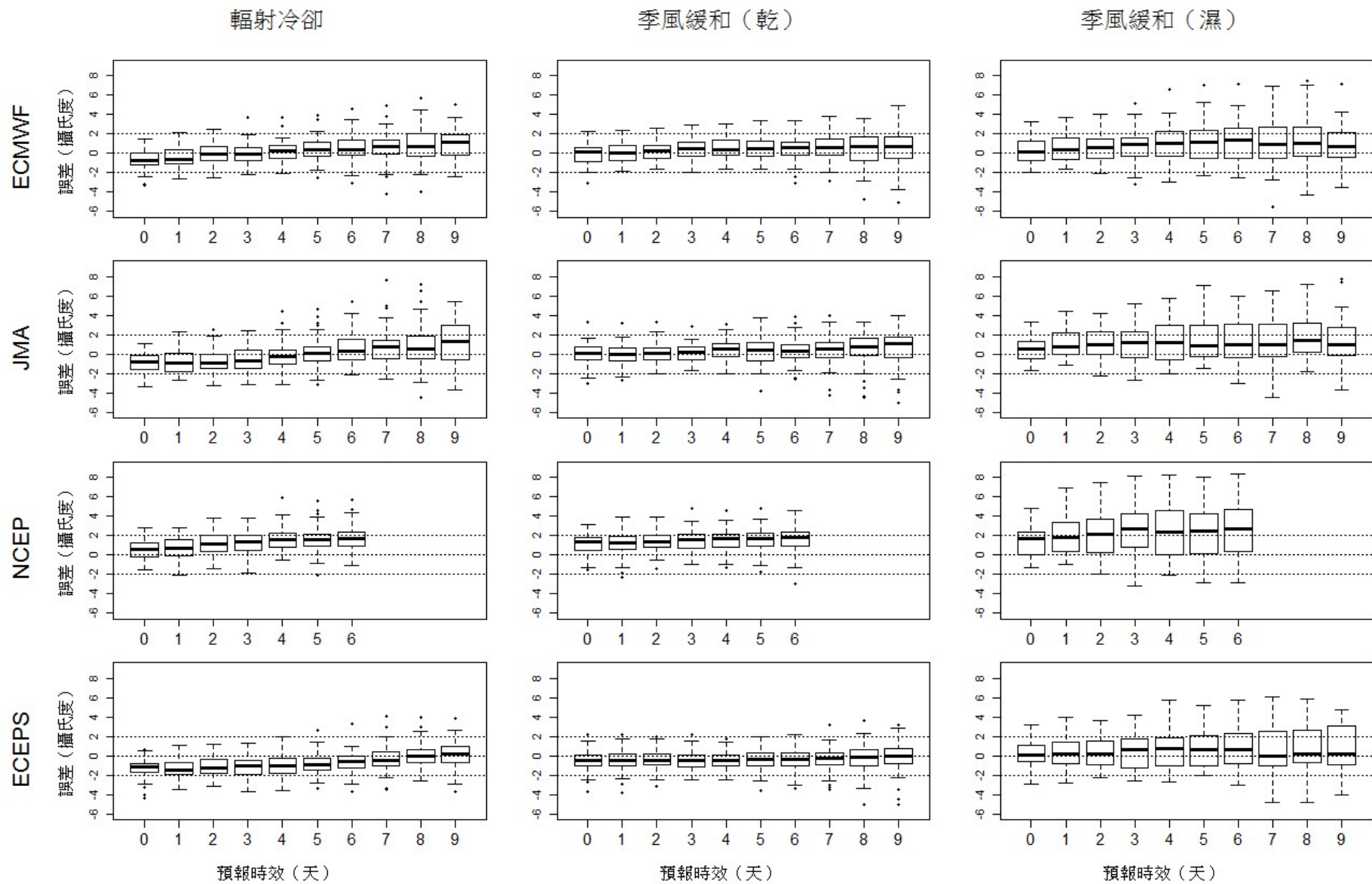
圖二 天氣情境分類流程圖。括號內的數字為各情境的日數在 -10/15- 訓練期內所佔的百分比。



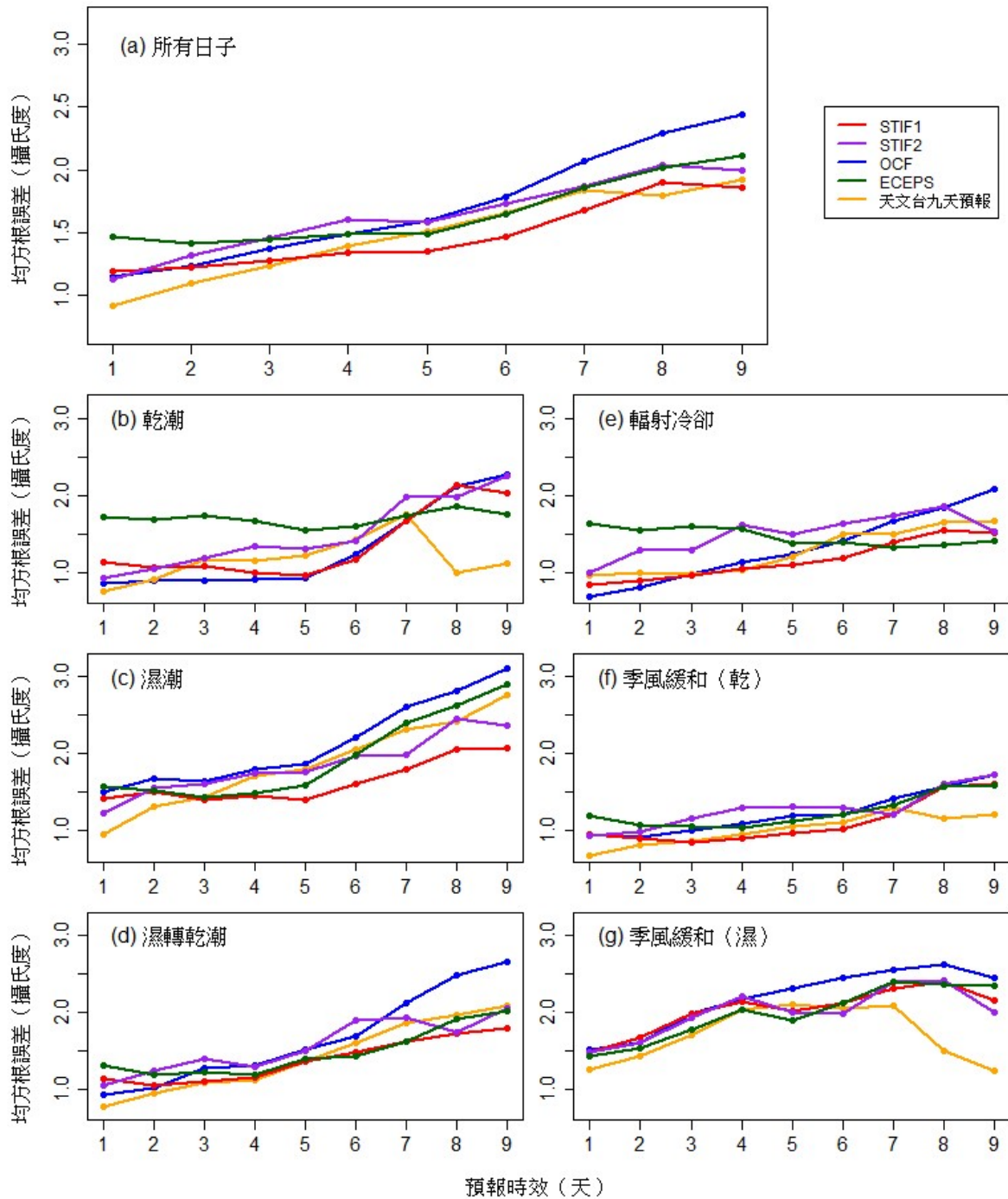
圖三 訓練期內所有日子 (不論天氣情境) 各數值模式低溫預報誤差在不同預報時效的分布。各箱型圖「箱子」內的粗黑線為中位數，虛線則顯示距離上四分位數 (箱子上端) 及下四分位數 (箱子下端) 不超過四分位差 1.5 倍的最大至最小數值範圍。



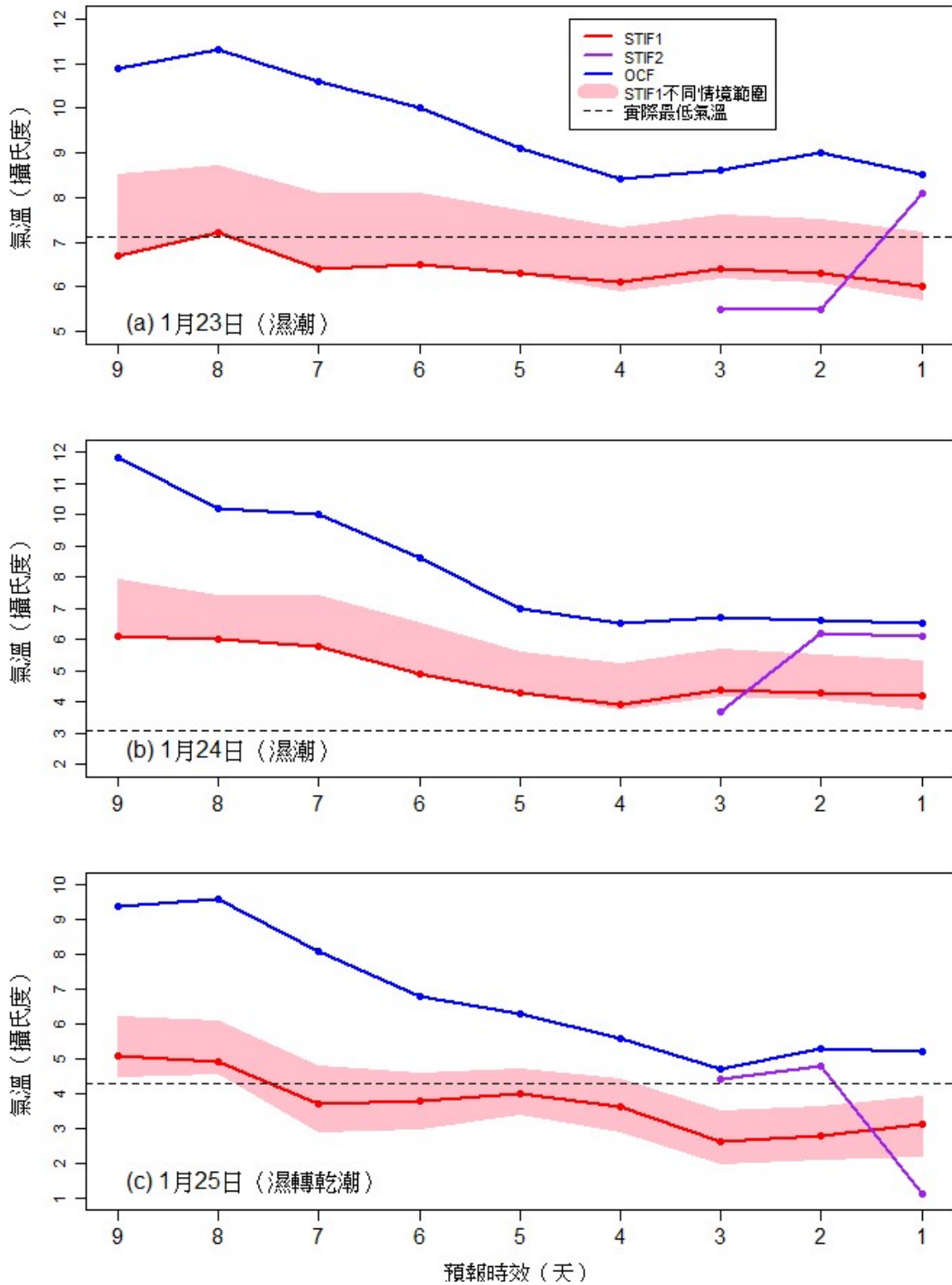
圖四 訓練期內各種天氣情境下，各數值模式低溫預報誤差在不同預報時效的分佈（續下頁）。



圖四 (續)



圖五 在訓練期內所有日子 (a) 及不同情境下 (b 至 g)，STIF 兩種運算方式、OCF、ECEPS 直接輸出及由預報員發出的九天天氣預報的低溫預測於不同預報時效的均方根誤差。(由於天文台在 2014 年 4 月將七天天氣預報擴展至九天，所以預報時效第八及九天樣本數目較少。)



圖六 STIF1、STIF2（只顯示預報時效第一至三天，與業務試行的時效相同）及 OCF（基於 12UTC 模式運算）對 2016 年 1 月 23 日至 25 日天文台總部的最低氣溫預報。圖中紅線及紫線分別為 STIF1 及 STIF2 根據實際出現的天氣情境（按照圖一所示的分類方法）得出的預報，而 STIF1 在不同情境的預報範圍則以粉紅色表示。