

出國報告(出國類別：其他)

「航空氣象現代化作業系統汰換及
更新計畫-國際氣象年度研討會」

American Geophysical Union (AGU)
Fall Meeting

服務機關：交通部民用航空局飛航服務總臺

姓名職稱：林文琳 主任氣象員

派赴國家：華盛頓特區，美國

出國期間：民國 113 年 12 月 8 日至 12 月 14 日

報告日期：民國 114 年 1 月 2 日

目次

壹、目的.....	1
貳、過程.....	2
一、研習行程	2
二、AGU 介紹.....	4
三、與航空氣象相關議題.....	7
利用對地靜止衛星資料進行基於機器學習的對流引發亂流強度估計，以促進航空安全.....	7
機場機率預報系統-強烈風切預測	9
使用 NeuralGCM 模擬極端降水.....	10
太陽高能粒子事件期間航空輻射模型的比較分析	12
邁向支援決策的太空天氣災害溝通工具	14
使用 LSTM 模式預報北印度與霧相關的氣象參數	16
使用 WRF 模式與機器學習進行海洋霧的研究	18
使用混和深度學習模式預報北印度洋的熱帶氣旋路徑	20
秋季西北太平洋熱帶氣旋頻率與春季西太平洋海溫異常之關聯	22
參、心得及建議	23

壹、目的

為持續提升本區航空氣象服務，民用航空局飛航服務總臺於 110 年至 113 年間推動為期四年的航空氣象現代化作業系統汰換及更新計畫(AOAWS-RU)。在此計畫中除整體改造本區目前航空氣象服務平臺軟硬體之外，同時安排氣象中心人員參與國際氣象年度研討會，以瞭解國際氣象新知與技術發展趨勢，提升氣象本職知能及我國航空氣象科技與服務水準。

本次參與 2024 美國地球物理聯盟 (AGU) 秋季會議 (Fall Meeting) 是於 12 月 9 日至 13 日於美國華盛頓哥倫比亞特區舉辦。AGU 是一個全球性的非營利科學組織，成立於 1919 年，致力於促進地球與太空科學領域的研究與知識傳播。每年舉行的秋季會議是全球規模最大、最具影響力的地球與太空科學會議之一，吸引了來自世界各地的研究學者、專業人士和科學家，涵蓋氣象科學、海洋科學、地震科學、環境科學、行星科學等多個領域。該會議為與會者提供了分享最新研究成果、討論科學議題及促進跨學科合作的寶貴平台，有助於推動地球科學技術及知識的進一步發展。

藉由參與此次國際研討會，我們期望能夠拓展視野，深入瞭解全球在劇烈天氣、診斷預報、氣候變遷影響及氣象數值模式預報等領域的最新專業發展及未來趨勢。同時，我們希望取法他國之長，適時調整我國航空氣象的發展規劃，進一步提升航空氣象預報、測報、警報及服務的效率與品質。希望此次研討會能為我們開創與國際合作發展航空氣象作業及系統的契機，促進跨國合作，共同應對航空氣象領域的挑戰。

貳、過程

一、研習行程

去程	113 年 12 月 07 日 112 年 12 月 08 日	07 日自桃園國際機場搭乘長榮航空 BR28 至美國舊金山機場，轉乘聯合航空 UA2110 至華盛頓杜勒斯國際機場。
研討會	113 年 12 月 09 日 113 年 12 月 13 日	09-13 日依 AGU 議程參與會議
回程	113 年 12 月 13 日 113 年 12 月 15 日	13 日傍晚自華盛頓杜勒斯國際機場搭乘聯合航空 UA1318 至舊金山機場，轉乘長榮航空 BR27 返回桃園機場。

日程一覽

	Sunday	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
All Day	Pre-Conference Workshops					
8:30 - 12:20		AM Poster Session				
8:30 - 10:00		Oral Sessions				
10:00 - 13:00					Exhibit Hall Hours	
10:00 - 18:00			Exhibit Hall Hours			
10:00 - 10:20		AM Break				
10:20 - 11:50		Oral Sessions				
11:50 - 12:20		Dedicated Poster Viewing (Online iPoster's and Poster Hall)				
12:20 - 12:30		Transition Break				
12:30 - 13:30		Lunch/Plenary/Town Halls				
13:30 - 13:40		Transition Break				
13:40 - 14:10		Dedicated Poster Viewing (Online iPosters and Poster Hall)				
13:40 - 17:30		PM Poster Session				
14:10 - 15:40		Oral Sessions				
15:00 - 18:00		Exhibit Hall Hours				
15:40 - 16:00		PM Break				
16:00 - 17:30		Oral Sessions				
17:30 - 18:00		Transition Break				
18:00 - 19:00		Town Halls & Events		Honors Ceremony, Town Halls & Events	Town Halls & Events	

二、AGU 介紹

美國地球物理聯盟 (AGU)是一個全球性的非營利科學組織，成立於 1919 年，致力於促進地球與太空科學領域的研究與知識傳播。每年舉行的秋季會議有來自 100 多個國家與 25,000 名以上的與會者分享發表最新的研究成果。是全球規模最大、最具影響力的地球與太空科學會議之一。今年的主題為[科學的下一步是什麼?](What's Next for Science.)



會議的進行有多種形式與分類。

Keynote and Plenary：講座會在每天的中午舉行，由來自各個領域不同職業獲得卓越成就的講者主持。從科學家、科學領袖，到作家和藝術家，這些成就卓越的人士將從他們獨特的背景中汲取靈感分享最新的科學發現、趨勢或全球性挑戰等重要議題。會議將透過現場演講及網路直播的方式進行，目的是使大家能夠共同參與。

Oral sessions：是針對特定研究領域或主題，由多位講者依次展示他們的研究。大部分講者會在現場進行演說，部分講者則可能提供事先錄製的簡報，讓與會者在會議中觀看。每個 **session** 通常有 6-8 位講者，講者有 10 分鐘能展演研究題目與接受提問。

Union sessions：是涵蓋更廣泛或跨學科議題的重要會議，例如氣候變遷、全球政策或地球系統科學等。這些會議也同樣採用現場與預錄混合的方式，讓更多國際專家或無法親臨現場的講者能夠參與。

Poster：實體海報展示，於每天安排上下午兩個展示時段。在這段時間裡，展示的研究人員會在各自的海報旁與與會者互動，回答問題、進行討論，並分享更多研究細節，促進學術交流和人際連結。

iPoster 指的是虛擬海報，展示者將以非同步的方式呈現他們的研究，他們會在線上平台上上傳展示內容，在不需要實時出席的情況下讓與會者查看和留言互動。與會者可以在自己方便的時間瀏覽這些虛擬海報，並透過留言或線上討論的方式與作者交流。

eLightning sessions，僅限現場參加。自 2018 年起，除了傳統的展示海報與口頭報告外，會議還增加了 **eLightning Session**，這是一種結合科學展示與互動的新形式，融合了傳統海報展示與數位技術。與會的科學家有 5 分鐘進行閃電演講，接著會於海報前介紹研究並和與會者討論，但比起傳統實體海報，**eLightning** 是使用數位海報，內含互動元素，如動畫、影像與高解析度圖像，使科學家能更加靈活地呈現複雜數據或概念。與會者則可透過觸摸或滑動來瀏覽內容。這種數位技術的應用增強了學術會議的互動性與展示效果，提供更加動態、豐富的學術交流體驗。

Town halls 是指為期 60 分鐘的公開討論會，將於每天的 12:30 和 18:00 舉行。這些會議通常針對特定主題，例如科學政策、研究趨勢或社會科學問題，由專家或領導者進行主持並引導討論。與會者可以在會中聆聽簡短介紹、了解該議題的現狀與挑戰，並有機會提出問題或分享意見。

Pre-conference workshops 指大會正式開始前一天(星期日)舉行的現場工作坊，需要提前註冊。這些工作坊旨在深入學習特定主題，通常由專家帶領，提供與會者動手操作、專題訓練或實作機會，讓與會者能夠更集中地掌握專業技能或最新方法。今年在會前的活動包含介紹新工具使用的工作坊、教導如何寫作提案以獲得研究資金等的主題。

Select in-person only learning activities will be held during the week

指的是僅限現場與會者的特定學習活動，這些活動可能包括實作工作坊、互動訓練課程或技能培訓等。這些學習活動通常強調實際操作，可能包含指導教學、示範或小組互動，藉此促進與會者間的互動與交流。具體形式會因活動類型而異，但通常以面對面的方式進行，以便於實際操作和經驗分享。

今年會議參與方式有包含實體與線上，但依據官網所提供的資訊線上參與只能收看 **Named Lectures**、**Union Sessions**、**Oral Sessions**、**Town halls**、**Global Café** 及部分 **iPoster**。由於這次會議有相當多的航空氣象研究是以實體海報呈現，即便 **AGU** 有提供線上平台供實體海報者可以上傳海報至雲端，但由於非強制規定上傳，只有少部分實體海報的報告者有將海報上傳至線上海報展演平台，因此建議未來若有相關出國計畫仍以現場參與為主，以利雙方面交流及蒐集重要資料。

三、與航空氣象相關議題

(基於學術倫理，下列介紹及心得謹提供文字說明)

Machine learning-based convectively-induced turbulence intensity estimation using geostationary satellite data for aviation safety

利用對地靜止衛星資料進行基於機器學習的對流引發亂流強度估計，以促進航空安全

Yoonjin Lee, Seoul National University, Seoul, Korea, Republic of (South), Soo-Hyun Kim, NASA Ames Research Center/Oak Ridge Associated Universities, Mountain View, United States, Jung-Hoon Kim, Seoul National University, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul, Korea, Republic of (South), Yoo-Jeong NOH, Colorado State University, Cooperative Institute for Research in the Atmosphere, Fort Collins, CO, United States and Dan-Bi Lee, Seoul National University, Seoul, South Korea

亂流一直是航空安全的重要課題。隨著氣候變化，東亞、東太平洋和西北大西洋地區的亂流發生頻率與強度增加，對飛航安全帶來更大的威脅，對精確的亂流預報需求也隨之增加。過去亂流預報主要是仰賴於數值天氣模式預測，但其結果往往受限於模式本身的設計。此研究主要是結合全球對地靜止衛星觀測資料與機器學習，利用衛星提供的高時間與空間解析度資訊，彌補觀測資料在空間上覆蓋範圍的不足，運用在檢測航行中可能遭遇的亂流。

亂流依生成機制可以分為多種類型，包括晴空亂流(Clear Air Turbulence, CAT)、山岳波和對流引起的亂流(Convectively Induced Turbulence, CIT)。其中 CIT 又可以進一步分為：對流雲內亂流(In-Cloud Turbulence)以及對流雲附近亂流(Near-Cloud Turbulence)。此篇研究主要聚焦於對流引起的亂流。

對地靜止衛星資料可以觀測到對流現象，以及由對流雲引起並向外傳播的重力波，展現了能檢測亂流的潛質。雖然衛星資料具有高時空解析度的特性，可以提供涵蓋全球的觀測資訊，但其缺乏垂直方向的資訊，為此作者結合機器學習方法進行補足。

研究中使用到兩種模型：

1. 檢測對流發生的模型¹：基於 CNN 架構的機器學習模型，使用 GOES-16 ABI²資料偵測的對流，如果知道對流發生的位置，就可以假設這些對流區域可能會產生亂流。
2. 估算亂流強度的模型³：基於 U-Net 架構的機器學習模型，使用 GOES-16

¹ Lee et al. 2021: <https://doi.org/10.5194/amt-14-2699-2021>

² Geostationary Operational Environment Satellite Advanced Baseline Imager

³ Lee et al. 2023: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-22-0137.1>

ABI 的亮溫資料預報三層垂直高度(FL100-180、FL180-240 和高於 FL240)可能出現的亂流強度推估。

在報告最後呈現模型在模擬實際亂流事件的表現。以 2022 年夏威夷上空的一次亂流事件為例。當時飛機正於穩定的氣層內航行，然而前方突然出現快速發展的對流羽狀雲，隨後造成了飛機經歷強烈亂流，該次亂流事件導致了多人受傷送醫。講者展示了從地面雷達和機器學習模型的結果進行比較，檢測對流發生模型有成功檢測到該事件中對流引起的亂流區域。此外估算亂流強度模型也成功估算出了該事件中亂流的高強度區域，與觀測結果一致。

未來的研究方向會朝：

1. 開發一種基於對地靜止衛星資料，用於檢測晴空亂流的方法。
2. 結合數值天氣預報模式輸出與對地靜止衛星資料，進一步提升亂流預報的準確性。
3. 針對不同氣候區域的模型適應性進行改進。

Airport Probabilistic Forecast system for the severe wind shear prediction

機場機率預報系統-強烈風切預測

Duho Jeong¹, Eun-Chul Chang² and Ui-Yong Byun², (1)Kongju National University, Gongju, Korea, Republic of (South), (2)Kongju National University, Department of Atmospheric Science, Gongju, South Korea

風切是指風速或風向在空間上的快速變化，對飛航安全影響重大，特別是在飛機的起降階段。風切預報是航空氣象預報中極具挑戰性的題目，若使用單一模式進行風切預報會面臨較大的不確定性，因此此研究採用隨機物理參數擾動趨勢(Stochastic Perturbed Physics Tendencies, SPPT)¹，建立一套基於系集預報的風切機率預報系統。

使用風切機率預報系統，進行對韓國仁川國際機場水平及垂直風切進行機率預報，並以實際發布的風切警報、低空風切警告系統(Low-Level Windshear Alert System, LLWAS)及多都卜勒雷達三維風場合成技術(Wind Synthesis System using Doppler Measurements, WISSDOM)資料進行驗證。研究中使用單一模式作為對照組，在與系集預報的實驗組相比，系集預報在模擬風切的強度與持續性表現的比單一模式有更高的準確性。部分的系集成員能捕捉到單一模式無法模擬出的強烈水平/垂直風切事件，凸顯了系集在風切預報上的重要性。

為進一步評估系集預測的表現，研究將系集成員的風切資料排序，引入了百分位數的概念，作為風切強度的指標。結果驗證，系集預報不僅提高了命中率²，還能通過提高百分位數降低誤報率³，實現更準確的風切預報。在 90%以上的百分位數下，其命中率幾乎是對照組的兩倍。

儘管系集預報存在一定程度的風切過度預報，但從飛航安全風險管理角度來看，使用系集概念的風切機率預報系統有提醒使用者提早認識風險並採取應對措施的作用。

¹ 是一種用於數值天氣預報(NWP)中的隨機物理擾動技術，通過引入隨機擾動來提高模式對不確定性的表現。

² Probability of Detection, $POD = \frac{Hits}{Hits + Misses}$

³ False Alarm Ratio, $FAR = \frac{False\ alarms}{Hits + False\ alarms}$

Modeling Precipitation Extremes with Neural General Circulation Models

使用 NeuralGCM 模擬極端降水

Stephan Hoyer, Janni Yuval, Dmitrii Kochkov and Ian Langmore, Google, Mountain View, United States

傳統的大氣環流模式(General Circulation Model, GCM)是基於物理概念去模擬全球環流的數值模式，但許多物理過程尺度較小，會使用參數化設定來模擬這些過程對大尺度氣候的影響，減少計算所需要的資源。但也是因為參數化簡化過程，可能導致模式結果與實際情況存在偏差，增加預測的不確定性。另外將模擬大氣環流運作過程拆解為多個獨立的部份，各部分彼此獨立運作，其相互影響僅通過輸入/出資料實現，而非直接呈現，難以進行整體優化。

近年來機器學習的進展為天氣預報提供了一個新方法：通過使用再分析資料進行訓練，再由模型進行天氣預報。這些由機器學習模型產出的天氣預報展現卓越的進步，並顯著地降低計算成本，展現出其潛在價值。但這類型模型由於缺乏物理定律的支持以及對訓練資料的高度依賴，使他們在未出現於訓練資料中的情境及模擬長時間尺度的氣候表現上較差。特別是在極端天氣事件的預測上，純機器學習方法往往難以準確捕捉這些罕見但重要的氣象現象。

Google Research 在 2024 年 7 月中旬於 Nature 雜誌上發表 NeuralGCM¹：一個結合人工智慧和物理基礎的混合模型。它將傳統的大氣環流模式與機器學習的技術相結合，使得模式能利用機器學習的優勢同時保持物理上的一致性。

NeuralGCM 是使用由 Google 開發的機器學習框架 JAX²，建立基於物理的動力核心(dycore)來模擬大尺度大氣動力過程。JAX 框架不僅提供可微分性，還支援高效能並行計算，大幅提升運算效率。其可微分性使模式可通過自動微分技術進行端對端的訓練，能夠更好地捕捉大尺度和小尺度過程之間的相互作用、進行模型整體優化。此外 NeuralGCM 採用機器學習模型來處理傳統 GCM 中需要參數化的小尺度過程，透過再分析資料進行訓練，實現更準確的物理過程模擬。

在實際運作上，NeuralGCM 首先從 ERA5³提取大氣狀態資料，將其輸入於前述的動力核心進行物理模擬，再結合 AI 模組進行預報，最終產生包含降水與

¹ Kochkov, D., Yuval, J., Langmore, I. et al. Neural general circulation models for weather and climate. Nature 632, 1060–1066 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07744-y>

² Frostig, R., Johnson, M., & Leary, C. (2018). Compiling machine learning programs via high-level tracing.

³ 歐洲中期天氣預報中心(ECMWF)推出的第五代全球氣候和天氣再分析產品，涵蓋自 1940 年至今的資料。

蒸發等大氣要素在內的預報結果。為了確保模式在物理上的一致性，模型同時預測降水和蒸發量，這使得水氣收支能夠維持平衡。然而由於大氣狀態和觀測資料之間存在一定的不一致，研究團隊需要對損失函數進行大量調整，才能使模型有效運作，實現端對端的優化。

NeuralGCM 在天氣預報結果與最先進的集合預報模式相比，表現出具競爭性的結果，也能將有效預報時間延長至數週。在極端天氣事件的預測方面，特別是在 95 百分位的強降水事件上，模型展現出優異的預測能力，但在 6 小時以下的短時降水預測仍有待改進。**NeuralGCM** 另一項重要工作是在氣候模擬，早期版本約只有一半的模型能成功運行模擬達 40 年，但經過持續改進，最新版本的模型穩定性已有顯著提升，可支援更長期的氣候模擬。

講者在最後進行降水結果的模擬展示：首先是熱帶地區降水，與實際觀測結果和其他模型結果進行比較，**NeuralGCM** 的降水在平均及年最大降水量與觀測資料更為接近，全球降水偏差較其他氣候模式減少約 50%，尤其是在模擬熱帶強降水帶以及它跨越熱帶的波動傳播時表現良好。另外在降水空間分布與出現時間上的誤差明顯小於其他模型。此外 **NeuralGCM** 在降水的日循環(**Diurnal Cycle**)上能更準確地捕捉降水出現的時機，特別是在陸地區域的表現最為突出。最新的研究將於近期公布，也將持續關注。

Comparative Analysis of Aviation Radiation Models During Solar Energetic Particle Events

太陽高能粒子事件期間航空輻射模型的比較分析

Hazel M Bain, University of Colorado/CIRES, Boulder, United States, Kyle Copeland, Federal Aviation Administration, Civil Aerospace Medical Institute, Oklahoma City, OK, United States, Christopher J Mertens, NASA Langley Research Ctr, Hampton, VA, United States, Guillaume Gronoff, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, United States and Yihua Zheng, Community Coordinated Modeling Center, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, United States

在太陽高能粒子發生期間，對於航行於高緯度極地航線的機組人員及乘客暴露於高輻射環境的風險增加，對健康可能帶來一定程度的危害。為避免高輻射對機組人員及乘客帶來的影響，航空公司必要時得捨棄極地航線規劃較不經濟的飛行計畫，使航行增加飛行時間、油耗等營運成本。

美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)的太空天氣預報中心(SWPC)向全球航空界提供關於大氣輻射環境的預警，也就是太空天氣警報(Space Weather Advisory)。根據國際民航組織(ICAO)的標準將劑量率分為中等(30 $\mu\text{Sv/hr}$)與強烈(80 $\mu\text{Sv/hr}$)兩個等級。提供航空相關人員做為參考。

然而缺乏現地測量的觀測數據，在航空運輸中的宇宙輻射劑量主要是仰賴模式估算。美國聯邦航空管理局(FAA)的 CARI-7A¹和美國國家航空暨太空總署(NASA)的 NAIRAS²是兩個常用的模式，也是本研究中作為比較的模式。本研究選取 GLE69³事件做為案例，比較兩模式在 41000 英尺高度的輻射劑量率的預報分析。就結果而言，這兩個模式在全球模擬上具有一定程度的一致性，但在接近南北緯約 5 度的區域，模式預報強烈(80 $\mu\text{Sv/hr}$)的等值線出現了明顯的差異。造成差異的原因可能為兩模式在設定上的差異：

1. SEP 質子能譜⁴：CARI-7A 模式仰賴 GOES 的測量資料，並假設能譜在高於 500 MeV 的範圍遵循 single power law⁵，然後使用中子監測數據來校正能譜

¹ Kyle Copeland, CARI-7A: DEVELOPMENT AND VALIDATION, *Radiation Protection Dosimetry*, Volume 175, Issue 4, August 2017, Pages 419–431, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw369>

² <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/NAIRAS~3.0>

³ GLE (Ground Level Enhancement) 當來自太陽帶電粒子能量足夠高時，會在地球表面產生可測量的效應。當兩個以上不同位置的中子監測器(包括至少一個近海平面的監測器)顯示出統計上的顯著增強，以及相應的空間儀器測量到質子通量增強時，即可註記為 GLE 事件。GLE69 是 2005 年 1 月 20 日發生的地面輻射增強事件。此事件特點為爆發極為快速，在數分鐘內達到峰值，南極洲監測站觀測到增加幅度達數千個百分比。

⁴ SEP Proton Spectra 指在太陽高能粒子事件中，質子的能量分佈情況。

⁵ $N(E) \propto E^{-\alpha}$

的高能部分，推斷其能譜形狀。而 NAIRAS 模式採用通過 GOES 的微分或積分通道進行，最佳擬合結果由 single power law, Ellison-Ramaty, Ellison-Ramaty double power law, 和 Weibull distribution 幾種方法中選擇，透過事件特徵與實測數據決定。

2. 截止剛度(Cutoff Rigidity, R_c)：它是決定高能帶電粒子是否能穿透地磁場的重要要素，當粒子動能超過其門檻後才能進入地球大氣層。CARI-7A 模式的垂直截止剛度分布圖是和不變緯度(Λ_c)¹的經驗關係式計算，並結合 Dst 指數²校正的太陽風驅動的動態效應³。而 NAIRAS 的垂直截止剛度則是通過 CISM-Dartmouth 模式決定的。在 GLE69 事件達到高峰時，兩模式垂直截止剛度最顯著的差異出現在赤道區域。

透過研究 GLE69 事件的高峰期間，經比較顯示兩模式在 ICAO 訂定強烈(80 $\mu\text{Sv/hr}$)的區域在兩極存在幾緯度的不確定性。而這種不確定性將對航空從業人員在規劃於太陽高能粒子事件時的飛行計畫存在影響。作者認為將兩模式做系集預報，可有效向航空從業人員傳達不確定性的範圍，有助於他們訂定決策。

¹ Invariant Latitude 對於空間中的任意一點，可以假設地球磁場是一個以地球為中心的偶極場，並沿著磁場線追蹤至地球表面。該磁場線在地球表面的足跡所對應的地磁緯度被稱為該磁場線的不變緯度，並沿整條磁場線保持不變。

² Disturbance Storm Time Index 用於衡量地球磁場擾動程度的指標。正常狀態下 Dst 指數通常在+20 到-20 nT(nano-Tesla)之間，當指數低於-50 nT 時，則表示發生了磁暴，且隨著指數值降低，磁暴強度也隨之增加。

³ $R_c = 15.062 \cdot \cos^4(\Lambda_c + Dst/19.11) - 0.363$

Moving Towards Decision-Support Tools for Space Weather Hazard Communication

邁向支援決策的太空天氣災害溝通工具

Katherine Ross and Rachel Parker, IDA Science and Technology Policy Institute, Washington, United States

這場演講比起科學研究，更多的是聚焦於太空天氣科學與溝通。太空科學家在理解及研究太空天氣都是這領域的頂尖佼佼者。但對其他領域的使用者在理解太空天氣的影響目前仍面臨許多挑戰。

在講者的其中一項專案中，採訪超過一百位以上不同領域使用太空天氣專業需求的使用者進行訪談，其中像是電力操作員、緊急應變官員、航空從業人員等...。關於大家的結果反饋中，許多人希望改善太空天氣量表。

雖然目前並沒有統一的共識來決定如何溝通太空天氣災害的風險，常使用的五級量表是作為太空天氣風險的評估方式，可能是在龍捲風與颶風也是使用這樣的方式。但這些量表通常傳遞非常技術性資訊，對一般使用者來說可能很難理解它的用途或傳達的資訊意涵，使得使用者不明白這些資訊的真正意義及他們應採取的行動與策略。特別在資訊缺乏具體的行動建議時，使用者可能無法評估其重要性，而忽略了潛在的風險，導致無法有效的對可能的影響做好準備。

目前太空天氣溝通中仍缺乏對於影響與風險的詳細描述，尤其是在解釋風險如何具體影響於航空作業時。以航空作業為例，簽派員依賴警報及預報資訊來規劃飛行計畫與風險管控。但當警報內容缺乏行動建議時，簽派員可能不知道如何將這些資訊轉化為具體作業對應。

但這並不意味著需要廢除這些量表，而是需要針對不同使用者創造不同的產品，以更通俗易懂的語言來傳遞資訊，使其更具大眾性。若溝通中若能包含不確定性與機率的資訊，將能有效提升使用者的應對能力。

另外傳統上常認為提供更多資訊就能幫助使用者做出更好的決策，但這是一種誤解。真正有效的溝通，應該是將資訊以符合人類心理反應的方式傳達，並針對不同領域的使用者調整表達方式。將溝通方式與人類對風險的反應和準備方式相結合，才能幫助使用者採取行動，減少風險帶來的損失。

最後講者提出提升太空天氣風險溝通的四項實踐建議：

1. 將太空天氣預報與系統影響和可採取行動的背景結合，幫助使用者理解具體影響。

2. 針對使用者量身定制溝通內容
3. 在預報中傳達機率與不確定性資訊
4. 融入風險與災害溝通理論中的經驗與教訓

NOAA Space Weather Scales

Geomagnetic Storms

Scale	Description	Effect	Physical measure	Average Frequency (1 cycle = 11 years)
G 5	Extreme	Power systems: Widespread voltage control problems and protective system problems can occur, some grid systems may experience complete collapse or blackouts. Transformers may experience damage. Spacecraft operations: May experience extensive surface charging, problems with orientation, uplink/downlink and tracking satellites. Other systems: Pipeline currents can reach hundreds of amps, HF (high frequency) radio propagation may be impossible in many areas for one to two days, satellite navigation may be degraded for days, low-frequency radio navigation can be out for hours, and aurora has been seen as low as Florida and southern Texas (typically 40° geomagnetic lat.).	Kp = 9	4 per cycle (4 days per cycle)
G 4	Severe	Power systems: Possible widespread voltage control problems and some protective systems will mistakenly trip out key assets from the grid. Spacecraft operations: May experience surface charging and tracking problems, corrections may be needed for orientation problems. Other systems: Induced pipeline currents affect preventive measures, HF radio propagation sporadic, satellite navigation degraded for hours, low-frequency radio navigation disrupted, and aurora has been seen as low as Alabama and northern California (typically 45° geomagnetic lat.).	Kp = 8, including a 9-	100 per cycle (60 days per cycle)
G 3	Strong	Power systems: Voltage corrections may be required, false alarms triggered on some protection devices. Spacecraft operations: Surface charging may occur on satellite components, drag may increase on low-Earth-orbit satellites, and corrections may be needed for orientation problems. Other systems: Intermittent satellite navigation and low-frequency radio navigation problems may occur, HF radio may be intermittent, and aurora has been seen as low as Illinois and Oregon (typically 50° geomagnetic lat.).	Kp = 7	200 per cycle (130 days per cycle)
G 2	Moderate	Power systems: High-latitude power systems may experience voltage alarms, long-duration storms may cause transformer damage. Spacecraft operations: Corrective actions to orientation may be required by ground control, possible changes in drag affect orbit predictions. Other systems: HF radio propagation can fade at higher latitudes, and aurora has been seen as low as New York and Idaho (typically 55° geomagnetic lat.).	Kp = 6	600 per cycle (360 days per cycle)
G 1	Minor	Power systems: Weak power grid fluctuations can occur. Spacecraft operations: Minor impact on satellite operations possible. Other systems: Migratory animals are affected at this and higher levels, aurora is commonly visible at high latitudes (northern Michigan and Maine).	Kp = 5	1700 per cycle (900 days per cycle)

Solar Radiation Storms

Scale	Description	Effect	Physical measure (flux level of >= 10 MeV particles)	Average Frequency (1 cycle = 11 years)
S 5	Extreme	Biological: Unavoidable high radiation hazard to astronauts on EVA (extra-vehicular activity), passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to radiation risk. Satellite operations: Satellites may be rendered useless, memory impacts can cause loss of control, may cause serious noise in image data, star-trackers may be unable to locate sources, permanent damage to solar panels possible. Other systems: Complete blackout of HF (high frequency) communications possible through the polar regions, and position errors make navigation operations extremely difficult.	10 ⁵	Fewer than 1 per cycle
S 4	Severe	Biological: Unavoidable radiation hazard to astronauts on EVA, passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to radiation risk. Satellite operations: May experience memory device problems and noise on imaging systems, star-tracker problems may cause orientation problems, and solar panel efficiency can be degraded. Other systems: Blackout of HF radio communications through the polar regions and increased navigation errors over several days are likely.	10 ⁴	3 per cycle
S 3	Strong	Biological: Radiation hazard avoidance recommended for astronauts on EVA, passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to radiation risk. Satellite operations: Single-event upsets, noise in imaging systems, and slight reduction of efficiency in solar panel are likely. Other systems: Degraded HF radio propagation through the polar regions and navigation position errors likely.	10 ³	10 per cycle
S 2	Moderate	Biological: Passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to elevated radiation risk. Satellite operations: Infrequent single-event upsets possible. Other systems: Small effects on HF propagation through the polar regions and navigation at polar cap locations possibly affected.	10 ²	25 per cycle
S 1	Minor	Biological: None. Satellite operations: None. Other systems: Minor impacts on HF radio in the polar regions.	10	50 per cycle

Radio Blackouts

Scale	Description	Effect	Physical measure	Average Frequency (1 cycle = 11 years)
R 5	Extreme	HF Radio: Complete HF (high frequency) radio blackout on the entire sunlit side of the Earth lasting for a number of hours. This results in no HF radio contact with mariners and en route aviators in this sector. Navigation: Low-frequency navigation signals used by maritime and general aviation systems experience outages on the sunlit side of the Earth for many hours, causing loss in positioning. Increased satellite navigation errors in positioning for several hours on the sunlit side of Earth, which may spread into the night side.	X20 (2 x 10 ⁻³)	Less than 1 per cycle
R 4	Severe	HF Radio: HF radio communication blackout on most of the sunlit side of Earth for one to two hours. HF radio contact lost during this time. Navigation: Outages of low-frequency navigation signals cause increased error in positioning for one to two hours. Minor disruptions of satellite navigation possible on the sunlit side of Earth.	X10 (10 ⁻³)	8 per cycle (8 days per cycle)
R 3	Strong	HF Radio: Wide area blackout of HF radio communication, loss of radio contact for about an hour on sunlit side of Earth. Navigation: Low-frequency navigation signals degraded for about an hour.	X1 (10 ⁻⁴)	175 per cycle (140 days per cycle)
R 2	Moderate	HF Radio: Limited blackout of HF radio communication on sunlit side, loss of radio contact for tens of minutes. Navigation: Degradation of low-frequency navigation signals for tens of minutes.	M5 (5 x 10 ⁻⁵)	350 per cycle (300 days per cycle)
R 1	Minor	HF Radio: Weak or minor degradation of HF radio communication on sunlit side, occasional loss of radio contact. Navigation: Low-frequency navigation signals degraded for brief intervals.	M1 (10 ⁻⁵)	2000 per cycle (950 days per cycle)

<https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation#>

Meteorological parameters prediction over Northern India, with a focus on Fog, using LSTM model

使用 LSTM 模式預報北印度與霧相關的氣象參數

Uma Das, Tanushree Roy, Oishila Bandyopadhyay and Dalia Nandi, Indian Institute of Information Technology Kalyani, Kalyani, India

對於印度而言，冬季濃霧造成在航空業及其他交通上造成巨大經濟損失。例如在 2011-2016 年間英迪拉甘地國際機場(DEL)因總計時長 653 小時的濃霧造成約 2.48 億盧比的經濟損失。另外在 2021-2022 年間，因霧造成的交通事故也增加了 18%。由於濃霧的形成與多個氣象參數的長期變化有關，傳統模式較難捕捉具長期依賴關係，為此作者提出利用機器學習模型中的長短期記憶模型(Long Short-Term Memory, LSTM)作為預測霧的氣象參數工具。

LSTM 是循環神經網路(Recurrent neural network, RNN)中的一種，主要由輸入門(Input Gate)、輸出門(Output Gate)、記憶單元(Memory Cell)以及遺忘門(Forget Gate)組成。其特殊的設計結構，可以控制資訊的選擇性保存或丟棄，使其適合用於處理和預測時間序列中間隔和延遲時間長的重要事件，能有效學習長時間序列中的關鍵特徵，且可同時預測多個特徵及多個時間步長的資料。

在此研究中使用印度德里氣象站 2014 年 1 月至 2015 年 2 月期間的氣象觀測資料，從數據中選出 4 個最重要的關鍵特徵參數：乾球溫度、相對溼度、露點溫度及水汽壓。作者將各數據經資料正規化(Min-Max Scaling)處理，壓縮所有特徵數值至 0-1 之間，避免其對模式訓練造成可能會使梯度爆炸或消失的問題發生，也使不同的特徵參數具有相同的數值範圍。作者採用兩層 LSTM 模式，第一層編碼器用以提取特徵資訊，第二層為解碼器，是根據編碼資訊進行預測，每層包含 64 個節點，其節點之間完全互聯，有助於捕捉時間序列中更多的特徵關聯性。資料為每 3 小時一筆，模型使用過去 96 小時(32 筆資料)來預測為未來 9 小時(3 筆資料)的情況。在訓練過程中使用的批次大小(Batch Size)為 16，訓練 100 個回合，以平均絕對誤差(MAE)衡量模式預測與真實數值的平均偏差。在四個關鍵特徵中預測露點溫度的表現最佳，其餘在乾球溫度及水汽壓的誤差也相當接近，而在相對濕度的預測中誤差最大。模式在對露點、乾球溫度及水汽壓上能很好的捕捉特徵，但對相對溼度的預測上有較大的改進空間。

作者也用其他常用於時間序列的機器學習模式：多元線性回歸(Multiple Linear Regression Techniques)、遞迴模式(Recurise)以及 CNN-LSTM 和本研究

的兩層 LSTM 比較。結果顯示在露點溫度及水汽壓的預測表現上，作者提出的 LSTM 表現上最佳。但在乾球溫度的表現略遜於 CNN-LSTM 與多元線性回歸模式。在相對溼度上與多元線性回歸模式的表現都還有相當的進步空間。相比其他模型，本研究中的 LSTM 可同時預測多個氣象參數，在實際應用上比其他模式更具優勢。

以目前的研究來說，僅用 4 個月的資料訓練模式，在數據的使用量來說可能不足，容易造成在訓練數據上表現良好，但在測試數據上表現就不佳的情況。另外像是濃霧這種是在特定綜觀天氣下出現的少數事件，對於模式預測出的結果可能會是好天氣居多，對於濃霧出現的預測準確性不足。針對濃霧這種季節性的現象，只選用一個冬季的資料可能會無法捕捉年際變化及其他環境因素造成濃霧形成的影響。而且當前的模式只能預測未來 9 小時內的氣象參數(乾球/露點溫度、相對濕度及水汽壓)會如何變化，提供在濃霧發生的可能性，並無法利用這些預報參數判斷是否會發生濃霧，這在實務上的應用仍有可以努力的空間。

與報告者的問答

Q：為什麼會選用 2014 到 2015 年的資料？直覺上近年的資料應該在時間的解析度會更好？

A：我們從一個資料缺失最少的小型數據集入手，發現 2014-15 年的數據適合用於此研究。我們也在分析近期的數據，未來將會發布相關結果。

Q：在 poster 中提及有使用 8 個氣象參數，能詢問其他 4 個是甚麼嗎？

A：其他還有包含濕球溫度、風速、風向和平均海平面氣壓。是根據資訊增益 (information gain) 選擇的。

Q：根據我粗略的認知，北印度起霧的情況是由於空污加上冬季擴散條件不佳，直覺和大氣穩定度有關，有考慮將探空資料納入作為分析材料嗎？

A：沒錯，北印度在冬季也受到嚴重污染的影響。在我們下一階段的研究中，將納入 PM2.5 和 PM10，並嘗試預測所有參數。另外之前沒有考慮使用探空資料，但會研究這一可能性。

Marine Fog Study using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model and Machine Learning.

使用 WRF 模式與機器學習進行海洋霧的研究

Piyush Teeloku, York University, Toronto, ON, Canada and Zheqi Chen, York University, Earth and Space Science and Engineering, Toronto, ON, Canada

霧對於飛航安全的影響很重要，目前許多天氣預報模式預報霧的成果不佳，並經常高估霧層內所含的液態水含量(LWC)。本研究是使用天氣研究和預報模式(Weather Research & Forecasting Model, WRF)與機器學習技術來改善對海洋霧的預報的準確性。

選擇加拿大東部沿海的 Yarmouth 與 St. John's 兩處進行研究，採用 2012 年至 2023 年期間每年 4 月至 8 月的氣象站每小時的能見度資料作為研究目標。而研究特徵如相對溼度、溫度、2m 的露點溫度、10m 的風向風速及地面氣壓值，由 WRF 前處理系統(WPS)和 ERA5 再分析資料生成。



使用二元分類器 Binary classification 作為監督學習方法分辨起霧(能見度 ≤ 1.2 公里)與非起霧(能見度 > 1.2 公里)。WRF 的設計為兩巢，解析度為 9km，模擬研究區域的天氣條件，將結果用於機器學習的研究特徵輸入。由於起霧事件發生頻率遠低於晴朗天氣，造成數據不平衡的問題。作者使用了隨機森林(Random Forest)、極限梯度提升(eXtreme Gradient Boosting, XGboost)、額外樹分類器(ExtraTreeClassifier, ETClassifier)和長短期記憶模型(LSTM)多種機器學習算法，時間序列資料按照 0.875 的比例分為訓練集和測試集，即 2012 年至

2022 年的資料用於訓練模型，而 2023 年的資料用於測試模型。並利用時間序列交叉驗證(Time Series Cross-validation)協助 XGboost 和 ETClassifier 找到最佳參數進行模型優化，避免過擬合訓練資料集。

測試階段使用 2024 年 4-8 月的資料進行檢驗。以 WRF 模擬的氣象要素投入機器學習模式，驗證未來 24 小時可能起霧的情況。使用 f1-score¹作為評分公式，結果顯示 ETClassifier 在預報能見度時取得最佳 f1-score，與單依賴 WRF 模式的結果相比，混合方法取得了較高的預報精確度。

單純的機器學習模型在面對這種起霧事件的資料相對稀少情況，模型在無法獲得良好的訓練下，會產出較差的預報結果。本研究提出混和 WRF 與機器學習的模式能有效提升較高的預報成果。但這種方法的缺點在於它仍然是依賴數值天氣預報模式的輸出。未來可能可以使用像 GraphCast 等先進的深度學習模式產品，避免前面提到天氣模式在霧層內的液態水含量高估的影響。

¹ $f1\text{-score} = 2 \frac{\text{precision} * \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}}$ ，被廣泛使用於比較機器學習領域中數據不平衡的資料集。1 為最佳分數。

Tropical Cyclone Track Prediction over North Indian Ocean using a hybrid Deep Learning model

使用混和深度學習模式預報北印度洋的熱帶氣旋路徑

Uma Das¹, Soumyajit Pal², Surovita Bose² and Oishila Bandyopadhyay², (1)Indian Institute of Information Technology Kalyani, Physics, Kalyani, India, (2)Indian Institute of Information Technology Kalyani, Kalyani, India

熱帶氣旋是最具破壞性的極端天氣事件其中之一，如果能提升對其路徑的預報能力，有助於政府部門事前的規劃與應變，以降低對生命及經濟的巨大損失。此研究中作者提出藉由衛星影像資料透過混和深度學習模型來預測北印度洋熱帶氣旋的運動軌跡。

使用的資料包含來自印度太空研究組織(Indian Space Research Organization, ISRO)下的氣象與海洋衛星數據中心(Meteorological and Oceanographic Satellite Data Archival Centre, MOSDAC)提供的衛星影像，時間從 2013 年 10 月至 2023 年 12 月，每 30 分鐘一筆。而氣旋中心的經緯度位置資料則來自於印度氣象部門(India Meteorological Department, IMD)下的區域專門氣象中心(Regional Specialized Meteorological Centre, RSMC)，同樣是從 2013 年 10 月至 2023 年 12 月，但位置資訊為每 3 或 6 小時更新一次，此研究將位置資料經由線性差分至每 30 分鐘一筆。

此研究的架構結合卷積長短期記憶模型(ConvLSTM)和長短期記憶模型(LSTM)。LSTM 已於前面有介紹過，是一種擅長處理時間序列、也可部分應用於空間序列的模型。但熱帶氣旋的衛星影像不僅傳達雲層形狀及分布的空間結構資訊，還有隨時間推移的氣旋連續性變化，單使用 LSTM 很難全面捕捉其特徵，所以作者導入 ConvLSTM。卷積長短期記憶模型是一種結合卷積神經網路(Convolutional Neural Network, CNN)與 LSTM 的神經網路模型。ConvLSTM 的架構由卷積層(Convolutional Layers)、輸入門(Input Gate)、輸出門(Output Gate)及遺忘門(Forget Gate)組成。卷積層負責從輸入中的影像提取其空間特徵資訊，而 LSTM 善於處理時間序列分析，ConvLSTM 將其兩者結合，能同時處理包含空間與時間依賴性資料的分析。

此研究 ConvLSTM 用於處理氣旋衛星圖像：第一層 ConvLSTM 包含 32 個單元，第二層包含 64 個單元，最大池化應用於之後的每層，為引入非線性特性，使用修正線性單元(ReLU)作為激勵函數使其模擬非線性關係，提升模型的表現力。而單層 LSTM 包含 64 個節點，用來處理經緯度的資訊，採用雙曲函數

(tanh)為激勵函數。ConvLSTM 與 LSTM 生成的特徵向量經拼接後，通過一個包含 4 個節點的全聯階層，最後輸出門包含兩個節點，分別對應經度及緯度。數據中以 2013-2019 作為訓練集，2020-2022 年作為驗證集和 2023 年作為測試集。

此模型在提供 12 小時數據，能預測未來 3 小時內每半小時的位置。模式的具體表現以均方誤差(mean squared error, MSE)及平均絕對誤差(mean absolute error, MAE)呈現。

在訓練集的誤差值非常低，模式能很好的學習訓練資料的特徵。驗證集的誤差比訓練集高出許多，模式可能存在一定程度的過擬合現象。測試集的誤差較驗證集的低，表示在模型在對於新資料的泛化能力上良好，整體呈現正面的結果，可適用於實際應用。

此模式的優勢在於能於單一模型中捕捉熱帶氣旋的空間及時間依賴性，並能同時預測未來氣旋路徑，若進一步於資料的預處理修改後，可用於更長時間的位置預測。未來進一步的改進目標於能同時預測氣旋強度的變化，以及對於模式的超參數進行調整以提升性能。

The Frequency of Autumn western North Pacific Tropical Cyclone Linking to Spring western Pacific SST Anomalies

秋季西北太平洋熱帶氣旋頻率與春季西太平洋海溫異常之關聯

Xuan Ma, Fei Xie, Xiaosong Chen, Na Liu and Rizhou Liang, Beijing Normal University, Beijing, China

西北太平洋每年生成的熱帶氣旋佔全球總量約三分之一，生成期間集中於 6-10 月。其中海表溫度(Sea surface temperature, SST)已被廣泛認為是影響熱帶氣旋生成的關鍵因素之一。各種年際變化的氣候現象(如 ENSO、PDO¹、PMM²)會改變海溫分布，進而影響海氣交互作用等遙相關，對熱帶氣旋的生成造成影響。

此研究使用透過特徵微觀態方法(Eigen Microstate Method, EM)³分析海表面溫度的空間與時間變異，提出並定義一種特有的西太平洋海溫分布樣態—馬蹄型樣態 (horseshoe-shaped warming pattern, HWP)。當春季 HWP 呈現暖相位時，Kelvin Wave 會引發赤道西太平洋大氣出現東風異常，而 Kelvin Wave 又透過 Bjerknes Feedback 使赤道西太平洋 SST 變暖，增強東西向的海溫梯度，加強了沃克環流(Walker Circulation)，進一步透過正回饋機制使西太平洋 SST 增溫。這一系列回饋機制使西太平洋海溫持續升高於秋季達到巔峰，為熱帶氣旋生成創造有利的條件。

研究通過分析 HWP 的時序變化定義 HWP index(HWPI)，結果發現在 2-3 月的 HWPI 與西北太平洋 9-10 月熱帶氣旋的生成頻率之間的相關係數達 0.4，並通過 99%信心測試，代表 HWP 模式對於熱帶氣旋生成頻率具有顯著影響。提出以 HWPI 作為預測指標，透過監控它在春季的表現可有效預測當年秋季西北太平洋熱帶氣旋可能的生成頻率。

此研究已於 2024 年 7 月發表於期刊⁴。

¹ Pacific Decadal Oscillation

² Pacific Meridional Mode

³ 一種用於分析複雜系統的數學分析方法。主要應用於多維資料的降維度和模式分解，從大量且複雜的系統資料中提取主要的特徵模態，簡化分析並捕捉系統的核心行為。

⁴ Xuan Ma et al 2024 *Environ. Res. Lett.* **19** 084019 DOI 10.1088/1748-9326/ad5fa8

參、心得及建議

1. 加強人工智慧(機器學習/深度學習)在航空氣象的應用

機器學習/深度學習在近年的大氣科學發展中展現了突破性的潛力，尤其隨著計算機能力的提升、大數據的可用性增加及演算法的優化，這項技術在天氣預測和氣候分析中取得突破性進展，亦成為相關研究的主流課題。本次研討會特別參與本總臺業務相關的航空氣象議題研討，獲得心得及建議如下：

(1) 心得：

A. 亂流：

- i. 隨著氣候變化，區域性亂流發生頻率與強度增加，而亂流為航空安全的重要議題。
- ii. 對地靜止衛星觀測資料提供的高時間與空間解析度資訊，能彌補觀測資料在空間上覆蓋範圍的不足。結合機器學習模型能成功偵測對流引起的亂流發生區域與強度估算，展現人工智慧應用於亂流預報的能力。

B. 強降水預報：

- i. 部分伴隨強降水之顯著天氣現象(例如雷暴)對飛航作業影響甚鉅，物理基礎的預報模式已接近發展極限，而純粹依賴訓練資料的機器學習模式，則可能難以準確捕捉這些罕見但重要的天氣現象。
- ii. **NeuralGCM** 研究結合人工智慧和物理基礎，融合傳統的大氣環流模式與機器學習技術的優點，提供了一種嶄新的氣象預報方式。

C. 濃霧預報：

- i. 濃霧常造成航空業的巨大經濟損失，由於濃霧的形成原因複雜，傳統模式往往不易掌握。
- ii. 本次參與的研討有提出兩層長短期記憶模型(LSTM)，在預測與霧相關的重要氣象參數(乾球/露點溫度、相對濕度及水汽壓)上，相比於其他常用於時間序列的機器學習模型，在預報結果上更具優勢。
- iii. 另有混和天氣研究和預報模式(WRF)與機器學習技術來改善對海洋霧預報的準確性，可見能有效提升預報成果。

D. 熱帶氣旋(颱風)路徑預報：

- i. 熱帶氣旋是最具破壞性的極端天氣事件之一，如果能有效提升對其

路徑的預報能力，有助於其接近機場時之風力預報，對飛航作業助益甚大。

- ii. 本次參與的研討提出藉由衛星影像資料透過混和深度學習模型來預測北印度洋熱帶氣旋的運動軌跡，實驗結果顯示具備作業潛力。

(2) 建議：中央氣象署刻正大力推動人工智慧應用於氣象預報之相關研究，爰可透過業以簽署的「民航局與中央氣象署技術合作協議」，將上揭人工智慧應用於航空氣象作業之相關議題納入後續協議工作，以使本總臺之航空氣象預報作業技術得以持續與國際接軌。

2. 強化對太空天氣的認識

目前在臺灣太空天氣是由中央氣象署太空天氣作業辦公室管轄，然而在有重大危害太空天氣事件時，可能對航空通訊造成干擾，輻射劑量增加也會對機組人員及乘客健康造成影響。過去的氣象訓練中對這一領域的關注相對有限。隨著 113 年 10 月美國太空總署(NASA)與美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)宣布太陽活動進入極大期，太空天氣對航空界的影響逐漸受到重視。本總臺已於 113 年度起邀請氣象署太空天氣作業辦公室舉行專題演講，增進相關人員對於太空天氣的認知。建議未來可於新進氣象人員基礎訓練期間新增太空天氣相關課程，將有助於提高風險意識與說明應對能力。

3. 持續派員出國參加國際研討會

參與國際研討會能讓本總臺學習目前最新的研究成果與技術發展，進一步提升預報專業能力，確保氣象服務能夠滿足使用者不斷提升的需求。國際研討會也提供跨領域交流的平臺，讓本總臺得以從其他相關領域的研究中汲取靈感與經驗，拓展預報與研究的視野，規劃航空氣象的研究計畫發展。透過會議可以接觸各國氣象領域的研究者，進行面對面的交流，期許能與國際學者在技術與研究上建立合作關係。因此建議未來能持續派員參加國際研討會，確保我國的航空氣象預報技術能持續與國際趨勢接軌，進一步提升服務品質。