

台灣太空天氣作業發展

Development of Space Weather Operation in Taiwan

李奕德^{1,2}、程家平¹、黃俊穎¹、何旭慧¹

1.交通部中央氣象局

2.國立中央大學地球科學院地球科學前瞻應用研究中心

摘要

Electron density distributions and structures of the Earth's ionosphere could significantly affect radio signal due to wave reflection and scattering. For instance, ionospheric radio absorptions and signal scintillations which resulted from solar flares and irregularities, respectively, are frequently occurred at Taiwan location. The Space Weather Operational Office (SWOO) of Central Weather Bureau (CWB) in Taiwan provides daily report, forecast, and the latest observations, as well as outreach education materials since 2015. SWOO integrates local and international space weather products and provides services including observation data, monitoring indices, forecast report, etc. Recently, few models are announced to provide forecast for the ionospheric scintillation (S4) index, ionospheric electron density, and the Earth's magnetopause position. In 2019, the FORMOSAT-7/COSMIC-2 are launched, and started to provide ionospheric density profiles which would further advance the space weather monitoring and forecasting for daily operation in Taiwan. More detail information for SWOO/CWB in Taiwan will be presented and discussed.

關鍵字：太空天氣、福爾摩沙衛星七號、模式預報

一、前言

太空環境(space environment)是指距離地球表面100公里以上的範圍，而在這之中的電漿濃度、輻射強度、磁場方向等各種參數隨時變化，就如同一般所謂的天氣隨時間而變化，因此科學家便將這些變化統稱為太空天氣。由於太空環境可自地球高層大氣起，一路延伸至行星際空間，因此太空天氣不單只是受到太陽活動的影響，也會受到地球底層大氣中的各類變化而有對應的變化。對於太空天氣除了穩定的週期變化之外，若是受到太陽表面劇烈活動或是地球大氣的擾動，也會產生有著明顯影響的暫態變化，更可能對於人類的活動產生影響。近幾年來，許多國家都將太空天氣視為天然災害的一種，投入大量經費與人力進行監控和作業維運，同時成立國家級太空天氣權責單位，避免所屬人造衛星、通訊設施、定位精確度等國防與民生活動受到劇烈太空天氣變化的影響。

自民國94年初起，交通部中央氣象局(CWB)為配合福爾摩沙三號衛星計畫與需求，與國家實驗研究院國家太空中心(NSPO)開始執行「臺灣資料分析中心(TACC)系統建置與維運計畫」以及「台灣資料處理中心(TDPC)建置計畫」，建立科學資料分析處理

系統。迄今，所產製相關的大氣與電離層之反演資料，可供各國氣象單位進行實質作業應用。透過國內外科學研究團隊成果顯示，掩星資料因可快速提供全球三維電離層電子濃度分佈，對於太空天氣變化的監測或是更進一步透過資料同化技術來提升現報與預報的表現，都具有大幅度進度的成果。

中央氣象局自103年7月起，氣象局著手相關業務的規劃並且展開「太空天氣作業辦公室(Space Weather Operational Office, SWOO)」籌設的相關準備工作，以期能夠配合國家後續衛星計畫任務並結合國內科學研究團隊研發的成熟產品，開發太空天氣作業系統，逐步建構我國太空天氣測報作業能力。後續於民國104年3月召開國內學者專家座談會，透過專家學者意見與利用學研界所發展成熟模組進行太空天氣作業發展工作，並配合「太空天氣模式測報系統建置計畫」的執行在氣象局內建置「太空天氣測報系統」，定時串接國內、外太空天氣觀測產品和數據資料，以及福爾摩沙衛星三號及七號的即時掩星資料。然後，再分別依照作業需求與臺灣地區的地域特性，進行數據計算後處理成對應的測報產品，強化我國的太空天氣作業能力。並於民國105年7月起，透過SWOO的網站以及其他社群媒體作為資訊供應平台，提供最新太空天氣資訊給一般大眾和合作單位，且依據合作單位

的不同需求提供客製化資訊頁面，提升對外的太空天氣資訊服務。

發展至今，太空天氣作業辦公室已具有與多數國家相近的每日作業基本能力，並能每日定時發佈太空天氣變化報告和提供未來太空環境預報，同時推廣太空科學教育及回應民眾問題(圖1)。本論文後續將就太空天氣作業辦公室目前所提供的觀測與監測資訊，以及負責維運之太空天氣模式提供更為詳細之說明。

二、觀測與監測資訊

由於太空天氣的成因多源自於太陽，受影響範圍涵蓋行星際空間、地球的磁場和電離層，對人類生活可導致全球性影響或是區域性變化。因此在觀測與監測資料上，除了地面觀測以外，也需依賴人造衛星的觀測產品協助。地面觀測主要包括有太陽黑子描繪、太陽表面影像、太陽輻射強度、磁力計、電離層探測儀、地面GNSS接收機與全天式影像儀，可提供太陽狀態、地磁強度與電離層電子濃度。衛星觀測可透過分別位在低軌道、同步軌道以及位在拉格朗日點(L1)的人造衛星以影像、現地量測和遙測的技術，得到太陽活動與輻射變化、行星際空間中的磁場狀態與太陽風參數、高能粒子通量、電離層濃度與結構等產品。透過多樣的觀測數據與產品，建構出即時太空天氣狀態。與其他國家太空天氣作業相似，主要須依賴美國大氣暨海洋總署(NOAA)所屬的DSCOVR和GOES衛星，以及美國航空暨太空總署(NASA)的SDO與SOHO衛星所提供的太陽表面、太陽輻射、高能粒子通量和行星際空間觀測資訊。同時，也以NOAA太空天氣預報中心(SWPC)所提供的Kp指數作為地磁擾動是否達到磁暴的基準。

除了前述資訊外，我國目前作業用太空天氣觀測包括有氣象局地面太陽觀測設備、全台三相地磁觀測網與地基GNSS接收站，並使用福衛七號的掩星觀測進行監測與結合至電離層模式之中。以下就這些觀測資訊進行說明：

(一)地面太陽觀測

氣象局自民國37年起進行太陽黑子觀測，具有長期太陽活動記錄和分析能力，且為全球合作測站之一。利用每日上午觀測條件良好之時段，透過Coronado SolarMax II 90 H-alpha Filter BF15搭配ImageSource DMK 23U274影像感應器拍攝太陽H α 影像，同時也利用Takahashi TSA-102S折射式望遠鏡搭配Thousand Oaks Optical TYPE 2和Canon EOS 600D拍攝可見光影像，並且進行人工太陽黑子手繪描圖與黑子計算來完成例行太陽觀測作業。

(二)地球磁場擾動監測

由氣象局地震中心所建置的全台地磁觀測網，每小時傳回全台7個測站(HC恆春、KM金門、LY鯉魚潭、TW灣丘、YH爺亨、CS池上、SM馬仕)的地磁觀測紀錄，繪製成台灣地區磁場變化時序圖。另外，為了能夠監測太空天氣事件發生時的臺灣地區地磁擾動特性，SWOO參考京都世界資料中心產製DST指數的方式，由德國地理研究中心(GeoForschungs Zentrum,GFZ) 每月所公告的前5地磁擾動寧靜日，計算出各個測站的年均地磁背景參考值。另外，由於臺灣地區所處的地磁緯度，水平磁場會受到太陽寧靜電流(Solar quiet current)的影響，所以還需要再透過前一個月的數值進一步計算所受影響的差值，才能得到準確的臺灣地區地磁擾動數值。此地磁擾動數值目前每小時更新，再與DST指數相互比較後可發現當受到太空天氣影響時變化一致(圖2)，但位在不同地理位置的測站仍會有強度上的差異。

(三)地面GNSS全電子含量觀測

全電子含量(Total Electron Content)是指單位面積上帶電粒子的累計量，目前國際上普遍利用地面天線接收來自全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)的訊號後，在計算電波路徑上的TEC數值。氣象局的TEC產品可以分為全球和區域產品，TEC數值的計算與產品繪製程式由國立中央大學太空所電離層電波科學實驗室科學團隊負責開發與更新[Sun et al.,2017]，由氣象局TACC團隊負責建置自動化作業程序與維運。此產品產製時，除了使用國際全球定位系統服務(International GPS Service)地面站點資料之外，也結合了福衛觀測所獲得之電離層電子濃度。經過網格化與球型譜和函數的內差與平滑後，可在陸地上和洋面上提供較佳的表現。另外，區域全電子含量圖，則是使用氣象局地震中心所架設之地面GNSS接收站，每小時結檔後由TACC將原始觀測資料轉為全電子含量後，再以全球產品作為背景參考值進行內插與平滑處理，產製區域全電子含量圖，空間解析度可達0.5x0.5度(緯度x經度)。

(四)電離層太空天氣監測

福爾摩沙衛星的掩星觀測，雖然可以提供全球三維電離層電子濃度分布。但在掩星觀測資料反演過程中，需要假設地球電離層為球型對稱且均勻分佈的層狀結構，因此對於電離層底部的電子濃度觀測有著較大的偏差量，甚至會出現負值的不合理現象。為了改善反演過程中所造成的誤差，提供更具參考價值的全球電離層電子濃度三維分佈，由國立成功大學的電離層科學團隊發展之電離層再分析(Global Ionospheric Specification)系統[Lin et al.,2017]，透過地面GNSS接收站的量測以及福衛所提供的掩星觀測並結合背景模式參考值後，能夠產生近即時電離層三維電子濃度

網格資料(圖3)，不僅能夠讓觀測資料有著更好的覆蓋率，也可提供使用者更具參考價值得三維資訊。

三、太空天氣模式

除了觀測與監測資訊之外，SWOO也提供模式產品供使用者參考以了解未來的太空天氣變化。部份模式產品是透過觀測資料進行計算，如：磁層頂位置模式、電離層電波吸收模式，另外也有經驗模式與數值模式等項目。以下就SWOO目前所維運的太空天氣模式進行說明：

(一)磁層頂位置預測模式

地球磁層可以阻擋高能粒子，平均位置約在6.6個地球半徑(約42,000公里)，所以大多數的人造衛星在正常狀態下都能位在地球磁層的保護範圍內。當太陽風風速上升或密度增加時，地球磁層將會受到太陽風擠壓而內縮，而讓人造衛星有較高的機會被太空環境中的高能粒子轟擊並造成異常。因此磁層頂位置預測對於人造衛星操控，特別是同步衛星軌道與橢圓軌道人造衛星極為重要。

磁層頂模式引用自Shue et al.[1997, 1998]所發表之磁層頂位置模式，藉由行星際空間的觀測資料可以推算受到太陽風擠壓後，太陽風動壓與地球磁層磁壓平衡的位置，此位置即為地球磁層頂所在位置。透過太空天氣測報系統取得NOAA/DSCOVR人造衛星所觀測到的行星際磁場分量、太陽風風速與太陽風密度數值，再導入次模式中便可以推算出地球磁層頂的所在位置。由於NOAA/DSCOVR人造衛星是位在第一拉格朗日點 (Lagrange Point 1)，距離地球約150萬公里，若以平均太陽風風速約為每秒鐘400至800公里估算，以次觀測資料計算後得到的磁層頂位置約略可視為40至50分鐘後的預報產品。

目前提供的資料為二維平面示意圖(圖4)，圖中包括磁層頂位置(紅線)、地球同步衛星軌道與GNSS衛星軌道(黑色虛線)、福爾摩沙衛星系列軌道(藍色線)與臺灣位置，灰點表示特定同步衛星之位置，藍點僅示意福衛系列衛星非實際相對位置。同步衛星軌道上所標式的人造衛星除了臺灣地區常用之通訊衛星外，包括日本的JMA/Himawari-8氣象衛星與美國NASA/SDO和NOAA/GOES15、16三顆分別用來監測太陽活動與太空天氣的人造衛星。本產品可提供使用者瞭解磁層頂與人造衛星的相對位置，以及評估目前的太空天氣狀態是否會影響衛星運作。

(二)電離層閃爍指數經驗模式

電離層電子濃度除了產生和消散的變化以外，大氣中的中性風風切、重力波等物理因素亦會影響到電離層電子濃度的分布與結構。當無線電波訊號傳過電離層時，會因為傳輸頻率以及電子濃度而產生不同程度的訊號傳播路徑偏折，此一現象導致接收到的訊號

強度(振幅)及相位產生不穩定變化，及稱之為電離層閃爍現象(Scintillation)。過去即有許多專家學者利用儀器研究電離層訊號閃爍的分布與特性，並將訊號振幅或相位在單位時間內的變化量值依照不同數學方法計算出對應的指數，此即稱作閃爍指數。在多種閃爍指數中，又以將訊號強度進行歸一化標準差之方式所得到的S4指數最為廣泛使用。

過去對於電離層不規則體或是電離層閃爍指數的觀測大多來自有限的地面觀測或單顆衛星探測進行特性與分布的研究，也因此相關成果所適用的地區或時間解析度十分受限。近期，雖然逐漸有結合多種不同頻段之地面和衛星觀測資料，建構出經驗模式，但以多種儀器所得到的觀測結果卻又難以針對電離層不規則體提供相同的閃爍指數。

在福爾摩沙衛星三號所提供的電離層掩星觀測資料中，除了透過射線全電子含量計算電離層電子濃度剖面以外，在接收訊號的同時也可以計算電波訊號的電離層閃爍指數。有鑑於此，國立中央大學劉正彥教授與陳世平博士利用福爾摩沙衛星三號2007年到2014年間的觀測資料[Chen et al., 2017]，建立全球電離層閃爍指數經驗模式，並可隨時間、地理位置與太陽活動推算電離層閃爍指數與發生機率。目前SWOO每日會根據預報的太陽10.7公分輻射指數(f10.7)計算未來72小時的全球與臺灣上空電離閃爍指數(圖5)，並且按照0.2、0.5和0.8三個不同的閾值計算閃爍指數超過此數值的發生率，可供定位、通訊等作業單位與科學單位參考與使用。

(三)電離層熱氣層耦合數值模式

電離層中的帶電粒子因受到太陽輻射游離中性氣體而產生，到了夜間則會因為光化游離作用減弱而重新結合成中性氣體降低電離層中的電漿濃度。不僅如此，電漿粒子也會受到中性風、大氣電場和地球磁場等的作用而改變空間分布。因此，雖然科學家利用過去各種觀測資料建立了極具參考價值的國際參考電離層經驗模式(International Reference Ionosphere Model)，作為觀測資料的比對和概略性的電離層狀態分析。但隨著電波通訊、衛星定位的發展，電波訊號傳播過程中受到電離層電漿濃度的影響也越受重視。若要能夠提供電離層太空天氣的預報資訊，單憑經驗模式仍然有所不足。SWOO目前採用美國國家大氣研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)高層大氣觀測站(High Altitude Observatory, HAO)所開發的熱氣層與電離層電動耦合環流模式(Thermosphere Ionosphere Electrodynamics General Circulation Model, TIE-GCM)，串接NOAA/SWPC所提供的太陽2800MHz輻射指數(F10.7)以及地磁擾動指數(Kp)三日預報數值，建立熱氣層與電離層的未來72小時逐時預報。

但是，單純利用模式進行電離層電漿濃度預報雖然可以反映出電離層隨著太陽活動與地磁活動的變化的特性，但仍容易發現到模式產品與觀測數據仍有顯著的差距。這當中除了包括模式當中的用來描述狀態的物理方程式不夠完善，也有可能是因為模式中的環境場與實際差異甚大。為了能夠讓模式產品可以更為貼近真實觀測，因此引進了資料同化技術來將所蒐集的觀測資料介接到數值模式之中，提供較佳的預報產品。

對於電離層而言，觀測資料能夠涵蓋全球範圍且較為即時的取得類型主要為台灣福爾摩沙衛星三號和七號利用掩星觀測技術所提供的電離層濃度剖線與透過地面全球導航衛星接收系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)接收機訊號所得到的電離層全電子含量兩類。SWOO現今也藉由國立成功大學陳佳宏副教授所帶領的電離層科學團隊所發展之電離層資料同化系統[Chen et al, 2016; Hsu et al., 2014, 2018, 2018; Lee et al., 2012, 2013]，將地面全電子含量和衛星掩星觀測的電子濃度資訊，透過NCAR發展的資料同化研究平台(Data Assimilation Research Testbed, DART)結合到TIE-GCM模式之中，可每小時產生未來三小時電離層與熱氣層的客觀預報產品(圖6)供科學團隊與作業單位參考和使用。

四、結論

自1989年魁北克停電、2003年萬聖節磁暴、2015年瑞典機場雷達干擾等事件發生後，太空天氣的影響不再只限於位在太空環境中的人員和物件，而是能夠以直接或間接的方式影響人類生活。綜觀國際發展與聯合國世界氣象組織(WMO)和國際民航組織(ICAO)等多個國際組織對於太空天氣的重視，顯示劇烈太空天氣對於人類活動有顯著影響，需要國家適當投入資源加以監控其變化及制訂相關策略來因應可能的風險。臺灣雖然是位處於地磁緯度較低的區域，但也不能夠輕視此議題，更也不能輕忽太空天氣的影響。中央氣象局有鑒於太空天氣相關作業流程與天氣測報作業相似，且體認劇烈太空天氣發生時對我國各項相關應用與關建基礎設施亦存在著一定的衝擊與影響，因此發展所需作業能力為我國政府與民間提供太空天氣的即時測報產品和在地資訊。從參考先進各國太空天氣作業中心的運作機制，收集與產製必要的資訊和產品，再與國內學研團隊合作轉移成熟作業系統，建置太空天氣所需基礎作業環境與能力後，再依規劃導入模式產品逐步發展預報作業能力，以強化相關測報資訊的服務。未來仍將以有限的資源推動太空天氣作業的發展，一方面整合國內外的測報資料並與各國交換作業經驗，另一方人面則積極推動跨單位合作，發展出與國際相當的作業能力。

參考文獻

- Chen, C. H., C. H. Lin, T. Matsuo, W. H. Chen, I. T. Lee, J. Y. Liu, J. T. Lin, and C. T. Hsu, 2016: "Ionospheric data assimilation with thermosphere-ionosphere-electrodynamics general circulation model and GPS-TEC during geomagnetic storm conditions", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121, 5708–5722.
- Chen S. P., D. Bilitza, J. Y. Liu, R. Caton, Loren C. Chang, and W. H. Yeh, 2017: "An empirical model of L-band scintillation S4 index constructed by using FORMOSAT-3/COSMIC data", *Advances in Space Research*, 60, Issue 5, 1015-1028.
- Hsu, C.-T., T. Matsuo, W. Wang, and J.-Y. Liu, 2014: "Effects of inferring unobserved thermospheric and ionospheric state variables by using an Ensemble Kalman Filter on global ionospheric specification and forecasting", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119, 9256–9267.
- Hsu, C.-T., Matsuo, T., Yue, X., Fang, T.-W., Fuller-Rowell, T., Ide, K., & Liu, J.-Y., 2018, "Assessment of the impact of FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS RO observations on midlatitude and low-latitude ionosphere specification: Observing system simulation experiments using Ensemble Square Root Filter", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123, 2296–2314.
- Hsu, C.-T., Matsuo, T., & Liu, J.-Y., 2018, "Impact of assimilating the FORMOSAT3/COSMIC and FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO data on the midlatitude and low-latitude ionospheric specification", *Earth and Space Science*, 5, 875–890.
- Lee, I. T., T. Matsuo, A. D. Richmond, J. Y. Liu, W. Wang, C. H. Lin, J. L. Anderson, and M. Q. Chen, 2012, "Assimilation of FORMOSAT-3/COSMIC electron density profiles into a coupled thermosphere/ionosphere model using ensemble Kalman filtering", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117, A10318.
- Lee, I. T., H. F. Tsai, J. Y. Liu, C. H. Lin, T. Matsuo, and L. C. Chang, 2013, "Modeling impact of FORMOSAT-7/COSMIC-2 mission on ionospheric space weather monitoring", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118, 6518–6523.
- Lin, C. Y., Matsuo, T., Liu, J. Y., Lin, C. H., Huba, J. D., Tsai, H. F., & Chen, C. Y., 2017, "Data

assimilation of groundbased GPS and radio occultation total electron content for global ionospheric specification”, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 122, 10, 876–10, 886.

Shue, J. H. et al, 1997, “A new functional form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape”, Journal of Geophysical Research: Space Physics, v102, pp9497-9511.

Shue JH et al, 1998, “Magnetopause location under extreme solar wind condition”, Journal of Geophysical Research: Space Physics, v103, pp17691-17700.

Sun, Y. Y., J. Y. Liu*, H. F. Tsai, A. Krankowski, 2017, “Global ionosphere map constructed by using total electron content from ground-based GNSS receiver and FORMOSAT-3/COSMIC GPS occultation experiment”, GPS Solutions, 1583-1591.

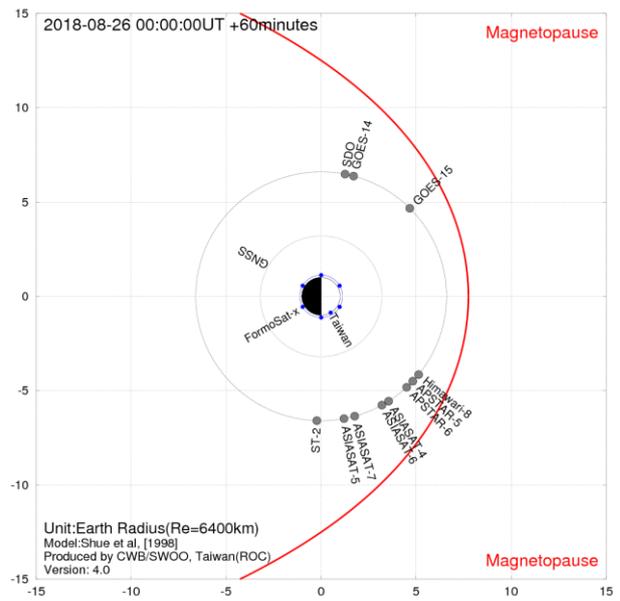


圖 4：地球磁層頂位置預測產品示意圖。

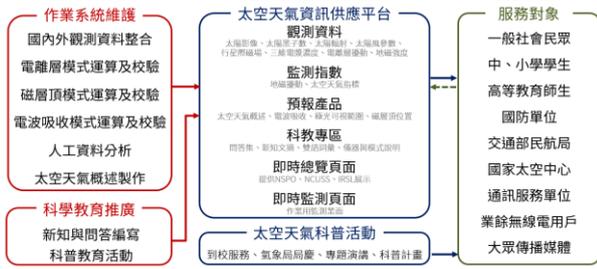


圖 1：太空天氣作業辦公室業務概況

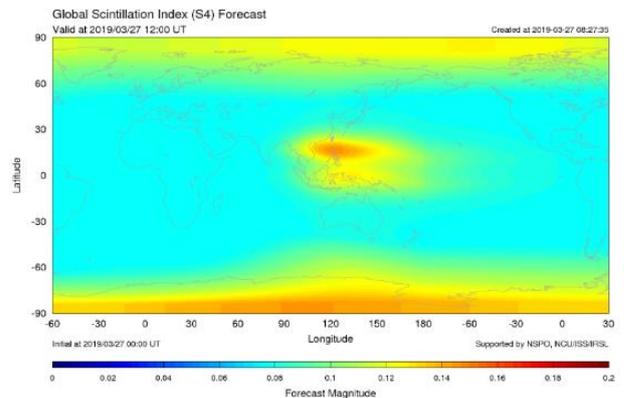


圖 5：電離層閃爍指數模式產品示意圖。



圖 2：臺灣地磁擾動數值與京都世界資料中心DST指數比較示意圖。紅線為SWOO計算之臺灣地區地磁擾動數值，灰線為DST指數。

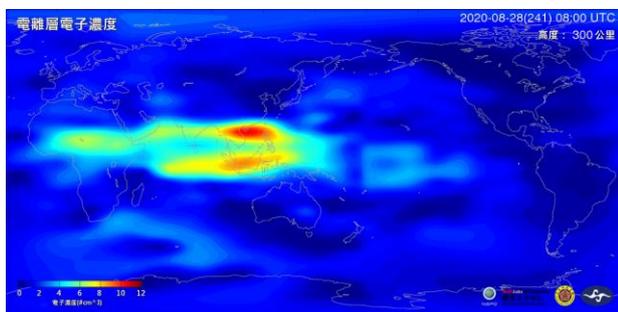


圖 3：電離層太空天氣監測系統(GIS)產品示意圖。

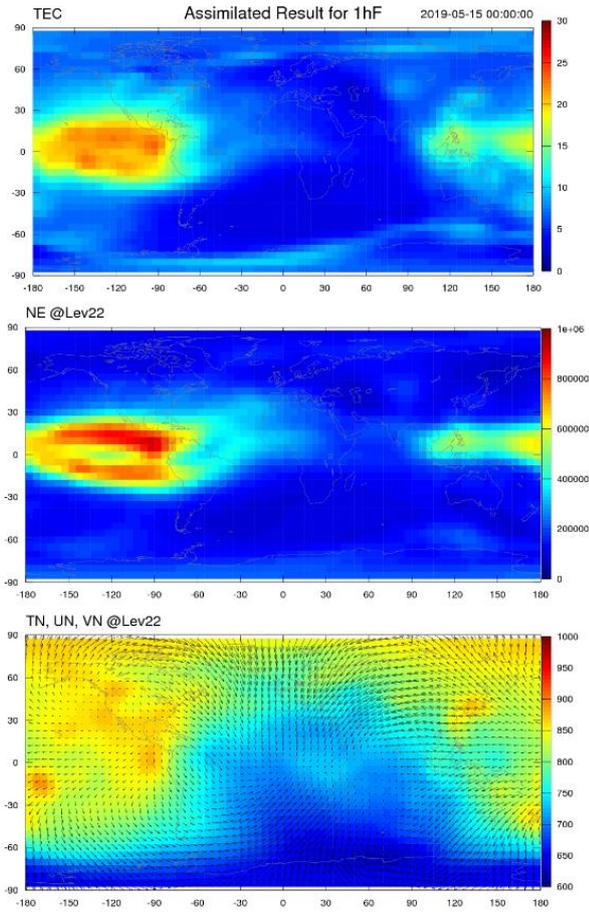


圖 6：電離層與熱氣層數值同化模式產品示意圖。由上而下分別為全電子含量(TEC)、模式第22層電子濃度、以及模式第22層中性氣體溫度和中性風向(黑色箭頭)。