

衛星觀測於航空氣象的應用

楊憶婷

一、簡介

氣象除了會影響航空器的飛行運作，也是影響飛航安全的重要因素之一。在美國聯邦航空總署(Federal Aviation Administration's; FAA)的國家飛安資訊中心(National Aviation Safety Data Analysis Center; NASDAC)的研究當中，在1994年到2003年間，有21.3% (4159次)的航空器意外事件與氣象有關，在這其中共有41.2%的機長未接受天氣講解或沒有聽過氣象簡報，可見詳細的天氣講解對飛安扮演相當重要的角色。對於航空器而言，具有危險性的氣象因子包含：亂流、風切、積冰、低雲幕、低能見度等等。因此，氣象觀測的正確性以及氣象預報的準確性，對於航空器的安全是非常重要的。

同時於二十世紀初，隨著航太工業的發展，美國的地面氣象觀測網漸漸擴大且密集。在第二次世界大戰後，雷達被應用於氣象上，作為辨識雷雨系統的位置、高度及移動的有效工具，大大提升了航空安全。在1980年代左右，T. Fujita做了一系列關於中尺度對流內風場配置的研究，而這些研究顯示跟許多航空器的墜落事件有關，因而引起FAA對觀測風場的重視。FAA設計了終端機場都卜勒天氣雷達(Terminal Doppler Weather Radars; TDWR)及低空風切警示系統(Low-level wind shear alert systems; LLWAS)並架設在美國主要機場。此外，這些研究也促使美國氣象相關部門致力於適合航空氣象的高時空解析度數值天氣預報模式發展及氣象衛星科技的運用，例如：美國國家環境預報中心(National Center for Environmental Prediction; NCEP)的Rapid update cycle model，以及美國太空總署(National

Aeronautics and Space Administration ; NASA)於2002年發展Advanced Satellite Aviation-Weather Products (以下簡稱ASAP)，將新的衛星觀測資料做整合並且提供給氣象作業上使用。

本文將針對NASA所發展的ASAP、而臺灣的氣象作業單位目前仍未使用的產品做介紹，以提供讀者進一步了解衛星可應用之層面。

二、對流發展

雷雨不單是影響飛航安全，也會影響航空器之正常運行而導致航班延遲或取消的現象，使得航空公司費時、費油料。一般而言，氣象雷達在作業上對於對流系統的掌握有很大的幫助，但是氣象雷達只能針對已經發展的對流進行監控，無法掌握積雲發展至成熟的整個生命期，因此衛星的對流發展演算法被應用至對流發展的預報作業中。

透過衛星的對流發展演算法除了可以辨識雲型外，還可以透過反演雲頂溫度預測對流發展與行進方向。以下將介紹三種衛星資料對於對流雲預報的應用。衛星若要實際應用在對流發展，必須頻繁更新資料，目前最適合的便是GOES同步衛星雲圖，大約15至30分鐘更新一次。第一種應用如圖一，除了將原來的衛星圖(圖一a)反演為不同的雲種外，還可以反演不同型態及特徵的對流雲(圖一b和c，主要透過不同的頻道反演)，此方法為convective cloud mask (CCM)，可以分辨出overshooting Cb(穿越對流層頂的積雨雲)、層積雲、積雲、卷雲等等。第二種應用是透過Atmospheric motion vector (AMV)演算法反演中尺度風場，主要的演算方式是透過advanced pattern-matching techniques和cross correlation statistics的方法計算。圖二為實際例子，利用分辨出中尺度對流導致的風場與數值預報的背景場，可以提供預報對流雲甚至還沒有發展成熟的積雲未來的路徑。

結合CCM和AMV技術，預報員可以透過衛星產品監控對流雲以

及雲的移動，但是我們更加希望知道，哪些個別的淺積雲未來有機會發展成積雨雲，透過衛星的演算法也可以預報雲發展趨勢，此為衛星對於對流雲發展的第三種應用。預報方法有很多種，其中之一是計算雲頂的冷卻率，根據Robert and Rutledge (2003) 的研究，在 $10.7\mu\text{m}$ 頻道的雲頂亮度溫度範圍在 $0^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 之間，如果15分鐘內的雲頂冷卻率達 8°C ，則有可能在30分鐘後發展成氣象雷達觀測35 dBZ以上的積雨雲。在Mecikalski and Bedka (2006) 研究當中，共利用8個門檻來判斷積雲未來發展成對流雲的趨勢，(1) $10.7\mu\text{m}$ 頻道雲頂亮度溫度、(2) 和(3) $10.7\mu\text{m}$ 頻道雲頂亮度溫度15和30分鐘冷卻率、(4) 雲頂亮度溫度快速低於 0°C 、(5) 和(6) $6.5\mu\text{m}$ 與 $10.7\mu\text{m}$ 的亮度溫度差和溫度差的時間變化率、(7) 和(8) $13.3\mu\text{m}$ 與 $10.7\mu\text{m}$ 的亮度溫度差和溫度差的時間變化率。在8個門檻中有7個達到標準時，便會有預報產品出現提供預報員參考。圖三與圖四為實際例子，圖三a、b和c分別是2003年5月4日1930 UTC、2000 UTC亮度溫度和冷卻率，圖四a為同時8個門檻中7個門檻達標準的產品，將圖三c和圖四a，與圖四b的2100 UTC雷達回波圖比較，可以發現確實掌握到對流雲的發展。

三、積冰

FAA利用衛星所發展的積冰產品稱為Current Icing Potential (CIP)，此產品需要使用多個頻道的衛星資料，白天透過Visible Infrared Solar- Infrared Splited-Windows Technique (VISST) 夜間透過Solar- Infrared Splited-Windows Technique (SIST) 的演算法，計算各種雲的性質，例如：雲中水滴大小、Liquid or ice water path (LWP or IWP)、雲頂的水相位和有效半徑 (effective radius, R_e) 等等，可以用來診斷發生積冰的可能性。

圖五為一實際個案，在2005年1月19日1915 UTC透過VISST演算

法求出LWP和Re，在俄亥俄州附近觀測到過冷水的LWP約800-1000 g m⁻²，且Re至少10μm以上，這一天有大範圍的雲覆蓋在此區域，由飛機報告中得知有中度積冰，平均水滴粒子約15μm，與觀測接近，但是液態水含量約0.4-0.6 g m⁻³不如所預期（通常LWP約700-1000 g m⁻²時，液態水含量約0.2-0.3 g m⁻³）。這個低估的原因主要是因為雲頂出現很大的Re，在VISST的演算法中估算LWP時會使用到Re，大的Re會使估算LWP產生誤差。

目前積冰觀測主要藉由CIP產品、飛機觀測以及飛機報告，預報員透過經驗及這些觀測產品做積冰預報。未來NASA計畫結合GOES-R和國家環境繞及軌道衛星系統（National Polar-Orbiting Environment Satellite System, NPOESS）提供更多頻道，以及更高的空間及時間解析度，並且改善目前的演算法提供給預報員更好的積冰觀測產品。

四、亂流

亂流的觀測及模式預報都相當困難，但是透過衛星觀測，有時甚至可以觀測到晴空亂流。以下我們舉兩個例子說明衛星在亂流觀測上的應用。

1. 山岳波

山岳波是氣流經過地形時，所產生的波動，是一種常見的亂流，波動所產生的雲常在高解析度的衛星雲圖中觀測到，但是那必須是山岳波有產生雲的情況下才能在衛星雲圖中看到，如果是利用高解析度的水氣頻道，透過Laplacian-of Gaussian filter (LoG) 得到水氣強度及方向的梯度分布，也可以觀測到水氣場如波動般的形態出現，如圖六所示，圖六是2003年7月25日0517 UTC的MODIS繞極軌道衛星，分別

在6.7 μm 及加強亮度的水氣頻道，透過LoG得到波動型態的衛星影像，也就是可能有亂流發生的區域。這種產品可以在GOES或是MODIS衛星得到。

2. 對流層頂摺疊導致晴空亂流

對流層頂摺疊導致動力上產生不穩定度，也可能激發晴空亂流，這種亂流可以被衛星觀測到。其主要的觀測原理是透過GOES水氣頻道觀測上對流層的比濕場，這種產品稱為GOES layer average tropopause specific humidity (GLASH)。GLASH會因為對流層頂摺疊，而隨著對流層高度增加有很強的梯度，此時該區域有可能產生晴空亂流。圖七為2005年11月14日1900 UTC的GOES水氣頻道得到的GLASH場，在暖色系和冷色系梯度大的地方表示副熱帶空氣和極區乾冷空氣交會處，有對流層頂摺疊發生，以灰色表示。紅點是飛機報告遭遇晴空亂流的位置，確實在灰色區域有觀測到亂流發生。

五、結論

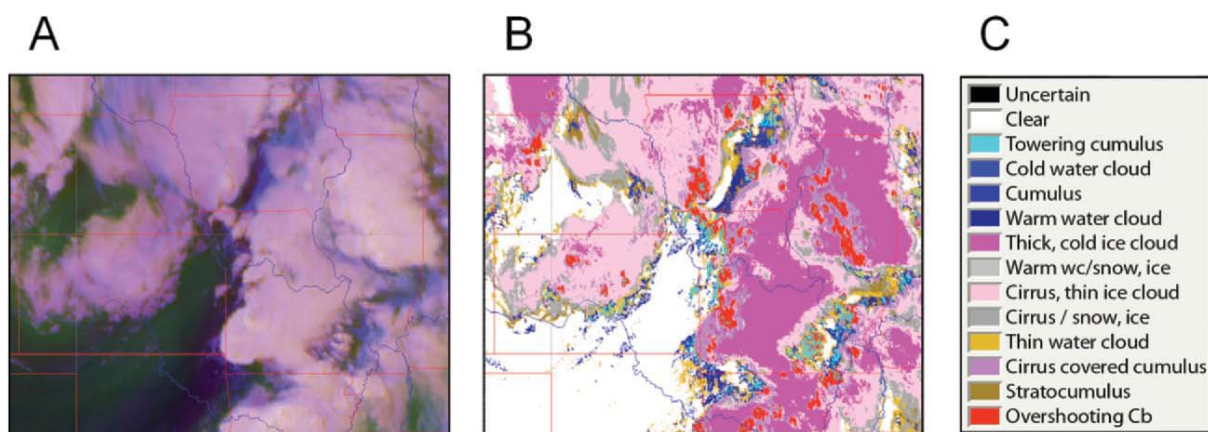
衛星技術日新月異，不再是只有從衛星雲圖上判別雲型及雲的位置。本文針對美國的衛星產品於航空氣象上的應用進行介紹，以期讀者能對衛星的應用有新的認識。目前臺北航空氣象中心所使用的產品中，與本文介紹相似的有雷雨辨認追蹤路徑追蹤與即時預報系統(TITAN)、Forecast Icing Product(FIP)演算法產生積冰預報產品、IFTA亂流演算法產生的亂流預報。

TITAN主要針對雷達產品分析與追蹤，但是沒有加入衛星資料，不能針對對流系統發展進行預報。FIP的演算法中，可以產生三種積冰預報產品，積冰發生機率、產生過冷水滴的潛勢及積冰強度預報，這些預報產品主要是由模式中雲的溫度、相對溼度、高度及垂直速

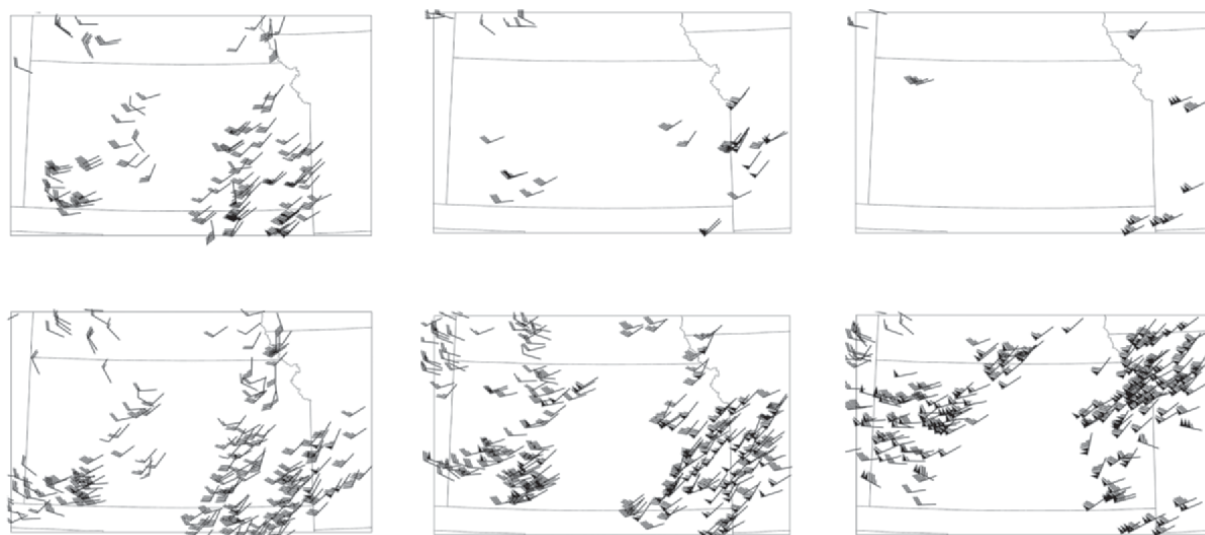
度，再由演算法去計算得到。另外，亂流預報是由模式輸出中，預報大氣的Richardson Number、大氣穩定度、鋒面形成位置與強度、及垂直和水平風切後，再透過IFTA演算法進行亂流預報。與本文介紹的產品中相比，主要差異是產品中沒有加入衛星的觀測資料，只有透過模式預報產品進行演算。衛星資料的時間解析度高，資料更新速度迅速，才能運用在作業單位，如研究單位常使用的Terra及Aqua衛星，對於科學研究中有很大的助益，但是資料更新速度慢且時間解析度低，不適合作業上使用。美國飛航情報區的衛星資料比台灣更新頻繁且資料量多，適合作業單位使用。隨著衛星技術進步，相信不久台灣也可將更多衛星資料運用在航空氣象中。

六、參考文獻

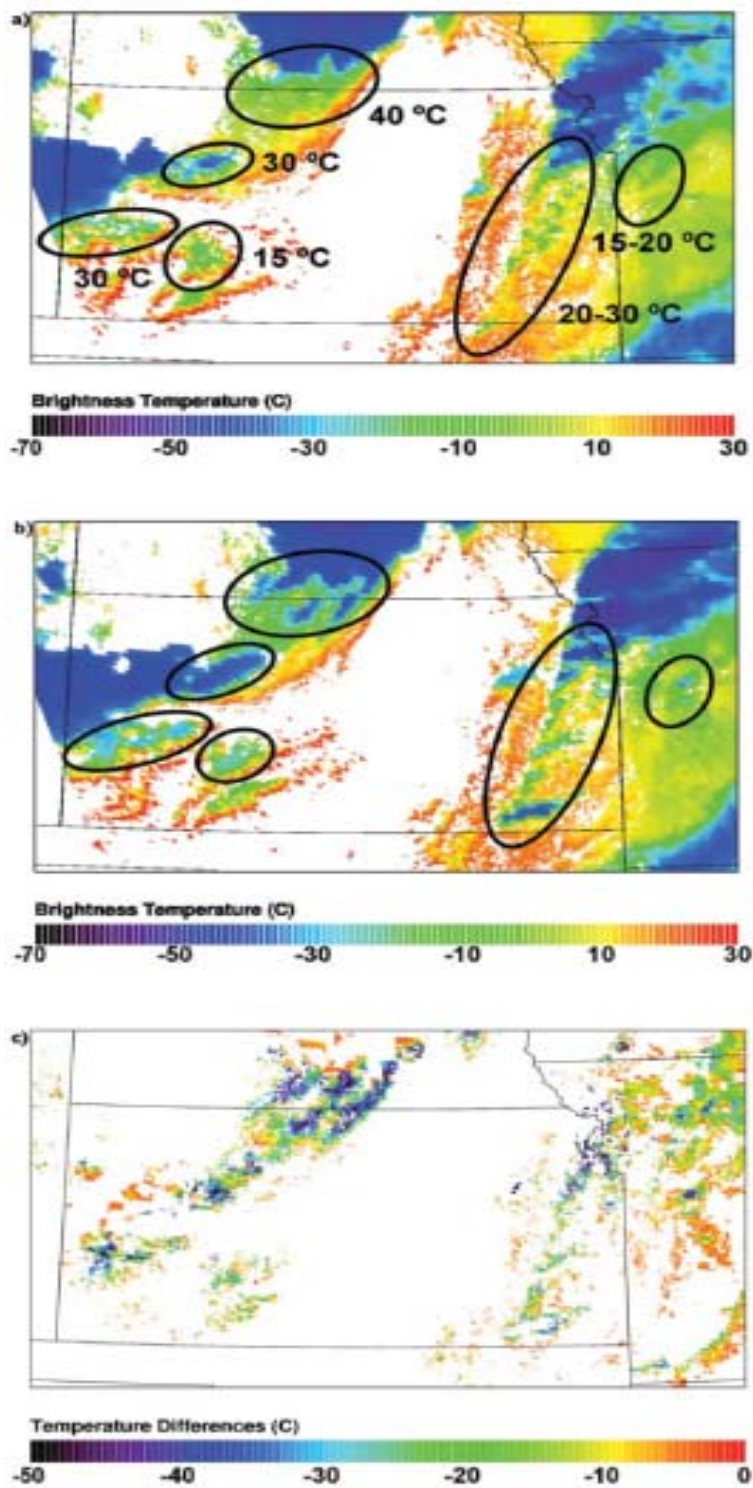
- Roberts, R. D., and S. Rutledge, 2003: Nowcasting storm initiation and growth using GOES-8 and WSR-88D data. *Wea. Forecasting*, **18**, 562-584.
- Mecikalski, J. R., and K. M. Bedka, 2006: Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 49-78.
- , W. F. Feltz, J. J. Murray, D. B. Johnson, K. M. Bedka, S. M. Bedka, A. J. Wimmers, M. Pavlonis, T. A. Berendes, J. Haggerty, P. Minnis, B. Bernstein, and E. Williams, 2007: Aviation Applications for satellite-based observations of cloud properties, convection initiation, in-flight icing, turbulence and volcanic ash., *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **88**, 1589-1607.



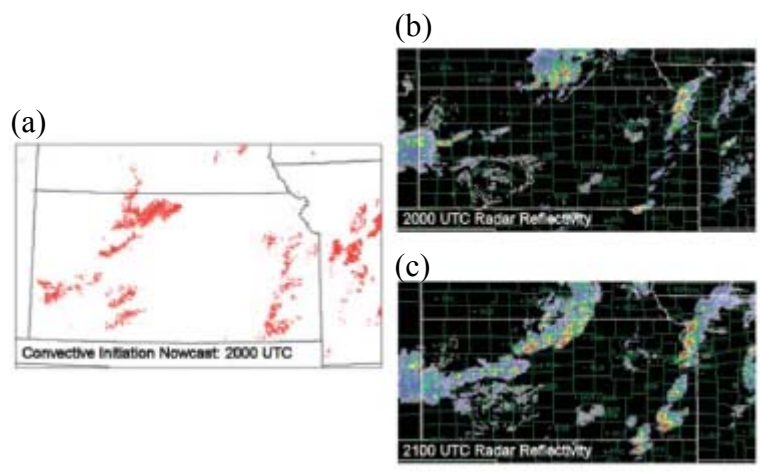
圖一：(a) GOES 衛星雲圖，(b) 和 (c) 為透過 CCM 將 (a) 反演不同型態與特徵的雲。



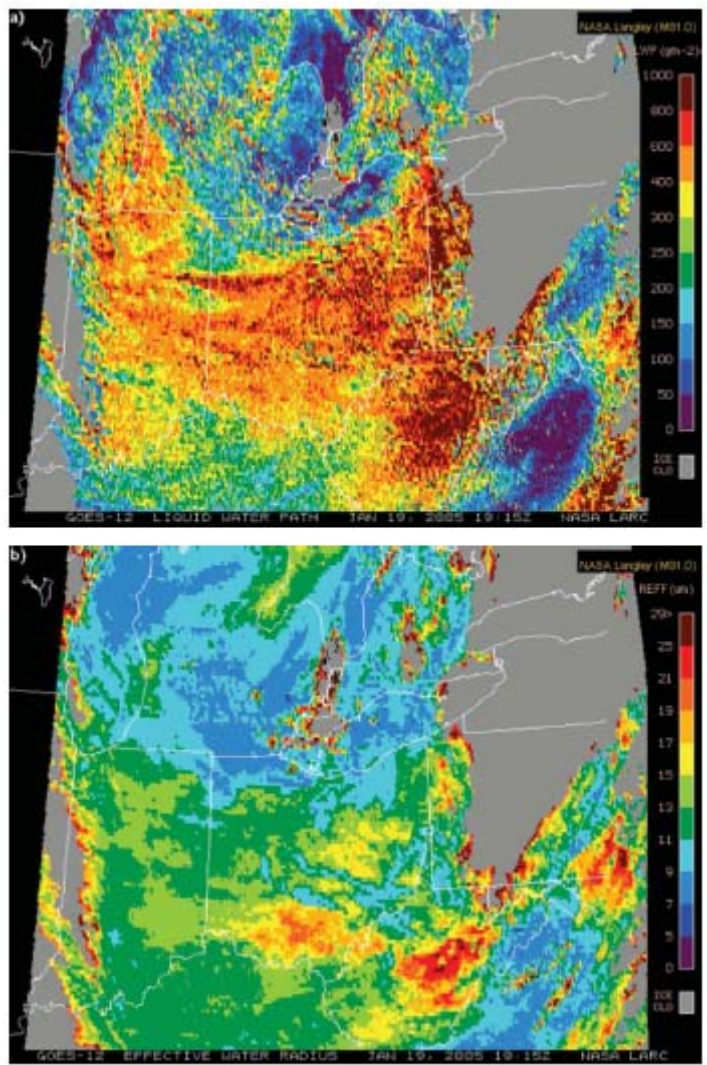
圖二：(上) (下) 分別為 AMV (NWP) 計算 1000-700 hPa、700-400 hPa、400-100 hPa 的中尺度風場 (背景風場)。



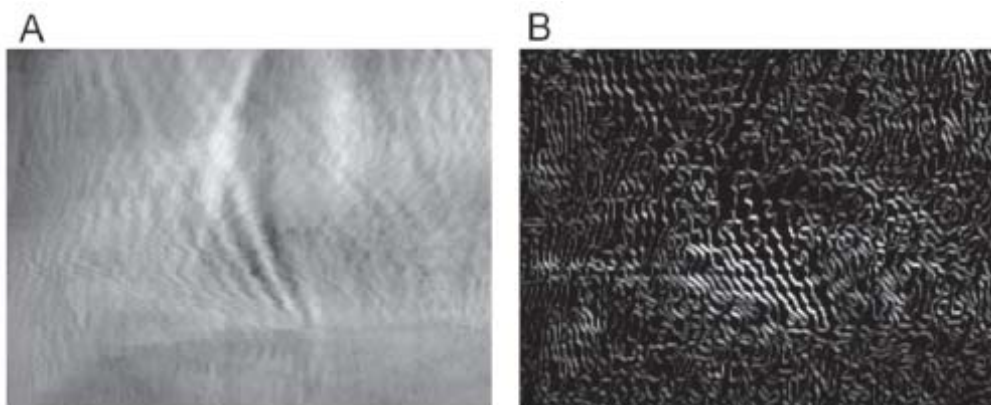
圖三：(a) (b) 2003 年 5 月 4 日 1930 UTC (2000 UTC) 的 GOES-12 10.7 μm 雲頂亮度溫度；(c) 為 30 分鐘的雲頂亮度溫度冷卻率。



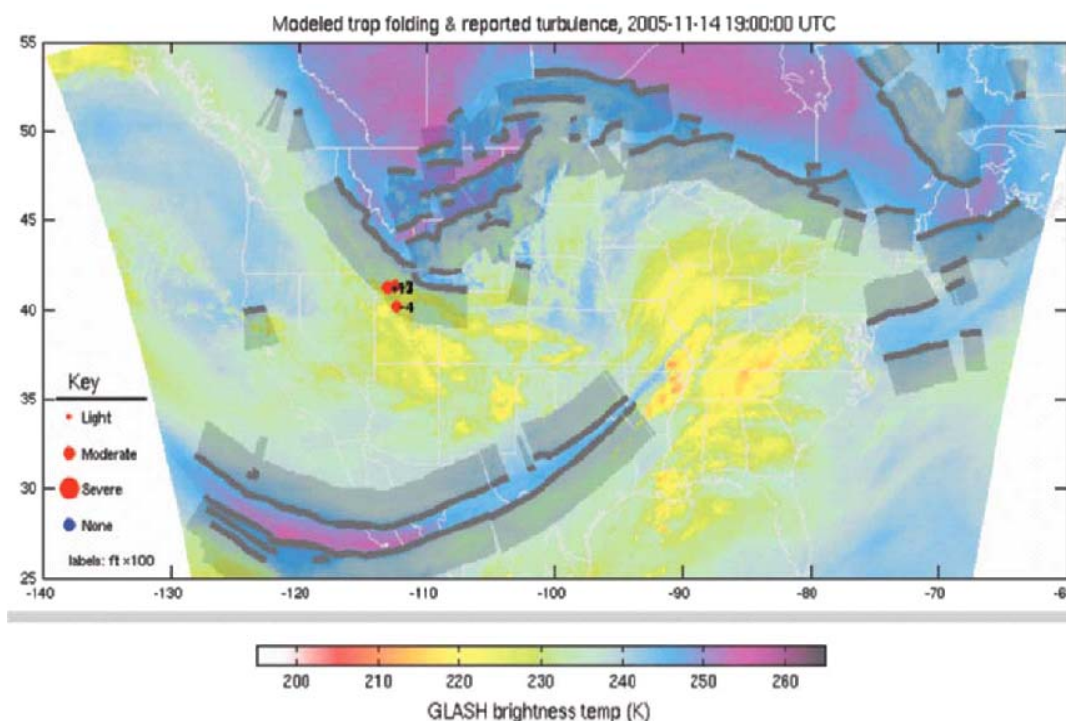
圖四：(a) 為利用 8 種門檻的對流雲發展趨勢預報產品、(b) 和 (c) 分別為 2003 年 5 月 4 日 2000 UTC 和 2100 UTC 的雷達回波圖。



圖五：2005 年 1 月 19 日 1915 UTC 由 VISST 演算法所估算的雲的 (a) LWP；(b) Re



圖六：(A) 和 (B) 分別為 2003 年 7 月 25 日 0517 UTC 的 MODIS 衛星，在 $6.7 \mu\text{m}$ 及加強亮度的水氣頻道透過 LoG 得到的衛星影像。



圖七：2005 年 11 月 14 日 1900 UTC 美國區域內，由 GOES 衛星水氣頻道得到的 GLASH 場，紅和黃的暖色系表示副熱帶空氣，藍和子的冷色系表示極區乾空氣，兩顏色梯度大處，以灰色表示，代表有可能發生對流層頂摺疊的位置，可能有晴空亂流發生，紅色點表示飛機報告有遭遇晴空亂流的位置。