

# 利用人造衛星預測天氣

W. K. Widger 合著  
C. N. Touart  
戚啓勳節譯

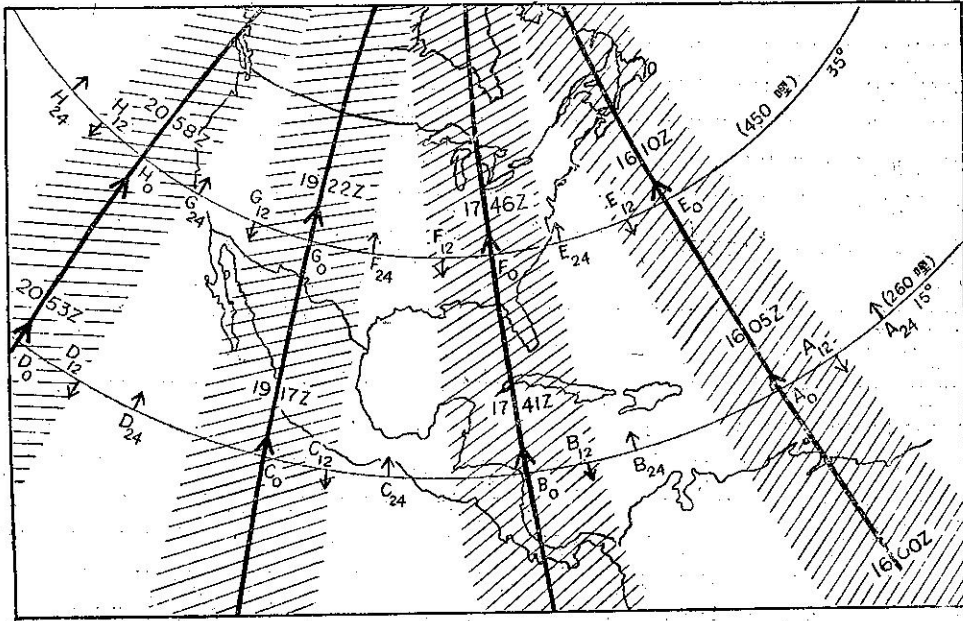
## 一、前言

利用人造衛星供給氣象情報作為預報天氣的依據，那確是一樁足以震驚世人的想法。最近有很多人在報章雜誌上著論對此有過份樂觀的看法。例如諾勃格 (Nordberg) 和史秋特 (Stroud) 認為：「唯有人造衛星才能遠在地球以外的一個測站上對地球的大氣層作近乎連續的觀測，以天氣預告學而論，特別具有其價值。」威克斯勒 (Wexler) 等也有同樣觀點。另一方面却也有許多氣象學家保持冷靜的態度。認為問題並不樂觀。

首先我們要問：以天氣預報的觀點，究竟希望人造衛星給我們一些甚麼資料？主要目的當在根據這種資料可以發展新的見解，由此而提高其氣象價值，從而使天氣預報進入新的境界。本文主旨即在討論利用人造衛星的資料在分析預報上的可能發展。我們必須指出：目前還不能將衛星觀測用於實際預報上，除非進一步研究，那些氣象資料能從衛星得到？那些資料必須得到？怎樣得到？這些資料如何運用？如何表達？再進一步研究這些寶貴資料的特殊分析技術，然後才能用到實際的天氣預報上。

## 二、人造衛星之一般限制

人造衛星的有效性將無可避免地受它軌道的物理法則所控制。假定是一種極頂軌道，離地高度350哩，每繞地球一週需時96分，假定空中的軌道面保持不變，則此段時間內地球當東移約經度22度。第一圖表示這樣一個衛星向北運行的軌道



圖一 人造衛星極頂軌道示例

星向北運行的軌道，1600Z 在西經60度穿過赤道，1605Z 約在北緯21度西經61度之天頂；1610Z 位置在諾伐斯各西亞 (Nova Scotia) 上空。下一次軌道約在1741Z 經古巴上空，1746Z 經底特律 (Detroit) 上空。第三圈軌道約在1917Z 穿過墨西哥海岸 (20° N, 105° W) 1922Z 經過丹佛。以氣象學的觀點來說，軌道的高度（

假定說250哩和600哩之差異）對於它在地球表面上的投影以及經過各點的時間都沒有太大的差異。

我們似乎可以合理假想：衛星高度倘在350哩，可望獲得距軌道投影兩邊各400哩寬度以內的資料。這樣的區域由無數小塊照相拼湊而成。在此假設前提下，軌道之間的空白地區將無資料可得。在美國南部，這種空白區域的寬度達500哩；至北緯55-60度，寬度當減至零。

當 12 小時和 24 小時後，衛星經過原先地區的時候，軌道的相對位置受衛星高度的影響很大。假定高度在 350 哩附近，隨後幾天的軌道對地球來說將會重合在一起，相隔12小時的軌道差不多完全相重合。因此按第一圖中

的例子，德克薩斯州的瓦茨堡在最近的將來都不會得到資料。如果高度低於 350 哩，則隨後 12 小時和 24 小時的軌道位置將會東移。第一圖內北緯 15 度處註明高度 260 哩。假定衛星之 260 哩高度軌道經過  $A_0$  上空北行約在 1600Z (當地正午)，12 小時後衛星向南運行，經  $A_{12}$  處約在當地子夜，24 小時後再向北運行，約在翌日當地正午經  $A_{24}$ 。因為對地球觀測需要陽光照射，當地子夜那次當然沒有正午經過的一次具有價值。

由於溫帶的天氣系統大多自西向東移動，因此當地正午經過而漸次東移的軌道，最合乎預報上的需要。但衛星運行軌道較低者，由於經歷之空間大氣密度較大，生命較為短暫，故常寧取較高之軌道。

當地正午經過的軌道，高於 350 哩的各層次以一種類似的情形向西移置。例如在第一圖內北緯 35 度上所註的是代表衛星高度 450 哩的情況。在溫帶中向這一方向移置比較不切需要。

如果真能照威克斯勒建議，衛星軌道的高度超過 1,000 哩的話，許多視界範圍的問題都可以迎刃而解。至於能否到達這樣高，當然要仰賴火箭的重大改進。我們可以想像到第一個以氣象為主的衛星不會有這樣高，因此要想把運行中的視界包括整個地表，除非有兩個以上的衛星在同時運行。

衛星觀測氣象所受到的第二種限制是因爲氣象測站首次在大氣層之上，而並不是在大氣層中間觀測，自然無法避免各式電磁輻射 (electromagnetic radiation) (包括那些在日視光譜中的) 的干擾，此在通常作地面氣象觀測根本不可能受到影響，或者毫無意義可言。

### 三、觀 測 方 法

利用適當工具附入衛星之內，應該可以從事三種氣象觀測，下面分別加以討論：

(一) 目視觀測 用一種電視照相機或類似設備，可以觀測到下列各項要素：

1. 雲 雲之有無、掩蔽量和它的伸展情況、雲之大小、雲狀、雲之方位和型式等。目前預想這些將是衛星觀測中最有價值的氣象資料。
2. 雲之移動 假定在短時間內對於一片雲的移動，能作十分準確的觀測，即可算出此雲塊高度的風向風速。倘在某一區域上空得到很多這種資料，就可以畫出氣流的一般形態。
3. 大氣雜質之飄流 假定衛星能夠看到工業區的煙或它種大氣雜質怎樣飄流，地面風向當可表達，再根據若干跡象來推斷地面風速當亦有可能。
4. 海 (或大湖) 面之狀態 假定目視分析的效果良好，也可以得到海面之風向和風速。
5. 能見度或大氣對光之透射度 這一項除供航空直接應用外，還可以幫助識別和追蹤氣團，以及推斷大氣的穩定度。
6. 地面積雪情況 根據地面積雪情況可以推斷氣團特性，由此而知將要產生的天氣，氣團經過積雪地區的邊界，稟性必有重大改變。

(二) 輻射觀測 測量特別選定的一些波長所發出或反射的輻射能量，可以推斷很多大氣情況的資料。按照目前和將來可能的發展，能夠得到的資料計有：

1. 迴射 (Albedo) (尤其是雲) 投射的日光被某一塊雲或一群雲所迴射的百分比，對於分析雲狀很有幫助。此外，根據迴射資料和間接得到的能量平衡資料，可望幫助解決很多預報方面的問題。
2. 對流極限層或其鄰近之溫度 我們有理由相信，對流極限以上的水氣和整個大氣中的水氣相比較，僅佔極微的比例。假定我們能多選定一種波長 (大概在六微米區域)，使得對流極限所發出的輻射剛好能穿過平流層的水氣。於是此一波長的輻射即成爲發射層的一個溫度函數。假定能測定不同吸收特性的數種波長，可能會得到整個大氣層垂直溫度投影的若干啓示。
3. 水汽總含量 測定兩相鄰波長輻射之反射強度，一種波長不爲水氣吸收，另一種則屬部份吸收。如此即可決定第一目視面 (即地面層或第一雲層之雲頂) 以上大氣柱之水氣總含量，水氣既集中大氣下層，故在無雲之情況，上項算得之量係指示較低層之濕度，據此可以識別氣團，推知其特性，追蹤其逐日行動。
4. 臭氧總含量 大氣柱的臭氧總含量也可以由類似測水氣含量的方法得到，但選定的波長不同。臭氧既然主要集中在對流極限以上很高的一層中，因此測定臭氧當不致受第一目視面是否爲雲而有重大的出入。臭氧最大量和高空 (一萬至四萬呎) 低壓槽有非常密切的關係，因此測量臭氧有助於對當時氣流型之分

析。

5. 地面（地和空氣間的交界面）溫度利用適當的紅內光線波長，測量地面溫度或水面溫度相當簡單。但此種溫度在陸上很短距離內就會相差很大，因此和平常所謂「地面」溫度（在離地四至六呎量得）並無一定的關係。

(三) 雷達觀測 雷達在波長3-10公分者能由水滴反射，因此可用以偵察雲雨。雪片也能反射雷達波，但不及水滴之有效。我們相信在衛星上如能有一適當的雷達操作，當可供給有關降水區域之資料。這些資料至少能有目前地面氣象觀測網供給天氣圖用報告那樣詳細。

雷達觀測的一種限制因素將是降水回波和地球本身回波之合併，它和脈波長度（Pulse length）有關。假定採用一種  $5 \times 10^{-6}$  秒之脈波長度，唯有降水伸展至離地五千呎以上才能和地面回波分離。

衛星上裝置用於觀測氣象的雷達，在操作上還有很多問題。但最重要的在於目前還不知道在技術上能否設計這樣一套合用的雷達，包括重量、容積、和必要的動力，並且還要能夠克服預料的環境和可靠性問題。採用雷達觀測之前，這些問題必須加以研究。

#### 四、資料傳遞

從衛星上藉電子儀表把資料傳至地面，因為中間有離子層的緣故，採用的波長必須使衛星唯有在接收站視線內才能作有效之傳遞。另一方面為了使每次軌道過後（或者至每兩次軌道）能夠讀出所有資料，並予傳播，必須考慮下面兩點：

(一) 用於預報的氣象資料極富有時效性。

(二) 因為要考慮空間和重量問題，並不切需的資料必須等將來衛星內部有大量蓄電能力再增加。

因此在地球各部份應該廣泛設置若干電子接收站，甚至於還要建立一極頂站。

分析氣象資料用於天氣預報是一種高度合作的技術。因此必須將各接收站所得到的資料儘速傳遞至分析中心，不能稍有延誤，接收站和分析中心之間必須有微波系統或電纜相連。此種分析中心最好就是主管廣大區域預報的氣象中心。

#### 五、資料處理

氣象學家經常要處理無數氣象紀錄，而人造衛星將會供給他前所未有的大量資料。這些資料又是一種圖畫方式，氣象分析人員對它完全陌生。如果要把它作適當應用，必須妥善地加以整理、編組、和表達。

假設自衛星發來圖片資料，並且轉到氣象中心。首先應該把它攝成永久保存的照片，並加以複印作為處理資料的基礎。因為這種照片資料勢必收到極多，因此要有很大的庫房存儲。永久紀錄照片應製成小型電影膠捲或顯微照相卡片。

我們相信處理資料的第一步將是以適當的自動方式，將衛星經過需要地區所得到的照片鑲嵌成一種永久性的正片，這是一種非常精細的工作，照片的比例尺大約在1：2,000,000至1：5,000,000。這種鑲嵌成的照片上應該註明衛星經過各點的時間，在照片上並不明顯的重要地理位置必須分別加以註明。一次運行所得的鑲嵌照片應該適合於連接其他相鄰並且近乎同一時間的鑲嵌照片，構成一幅範圍很大的照片，也許能包括半個地球。這種集錦式的鑲嵌照片預料將成為分析用的基本資料，並作成永久性的檔案存於氣象中心。短期預報需要參閱過去一週的照片，長期預報需參閱過去一個月的資料。

任何未經分析之衛星資料，似不應傳播至一般預報單位，最好完全由氣象中心來加以處理，氣象中心據此而得到的預報再傳至各氣象台。衛星所供給的部份基本資料需直接應用，或從事當地詳細預報所必需者，可以由氣象中心傳遞至各地氣象單位。

研判上述鑲嵌照片後，分析人員對於部份地區可能需要放大（比例尺大概在1：500,000），印製這種照片，時間上必須迅速。通常大氣煙塵散播區和研判地面風的地區經常需要放大。

假定能觀測雲的移動，應選所需資料加以計算。雲之移動向量自動填入一張永久性的底圖上，比例尺為1：10,000,000。計算之距離間隔為一百哩。換句話說，每一百哩算一次已能合乎需要。另外要填一張能夠擦去的透

明膠板，比例尺和鑲嵌照片相同。

輻射資料收到後應轉換為氣象應用的單位再填，雲之迴射和水氣總量數值必須不斷填入，使能表出它的型態。它種數值可採用一百哩之間隔。紀錄自動填入一種1:10,000,000之永久底圖上。

雷達資料可假定其為手指形，表示降水之出現與否，倘有出現，尙可表達降水頂之高度。這種資料必須自動填入永久性底圖內，另外要填一張和雲之鑲嵌照片屬同一比例尺的透明膠板圖。

### 六、衛星資料對天氣分析預報上之應用

目前應用的預報技術和將來可能得到的衛星資料並不能配合。因為現在預報員的作業最重要的因素是風、氣壓、和溫度的分佈。雖然我們也希望將來的衛星靠輻射的測定也能搜集一些這一類的資料，但無論質和量都不會較目前所得為豐富。預料人造衛星最重要的觀測將是雲，此在目前却並不把它作為一種基本因素看待。

因此當前只有兩種辦法：一種是改變衛星資料以適應預報員的胃口，否則就得改變預報員所用的方法以適應資料。前面這一種大概是比較好的辦法。換句話說，基本目的在於不另外設計一套預報技術，而是把衛星所得轉變為對目前預報方法具有價值的資料。當然，這並不是說預報技術絕對一成不變。其次我們必須考慮到一種可能性：衛星資料可能會根本改變了我們對於大氣的認識，因此而發展成一套嶄新的預報技術。

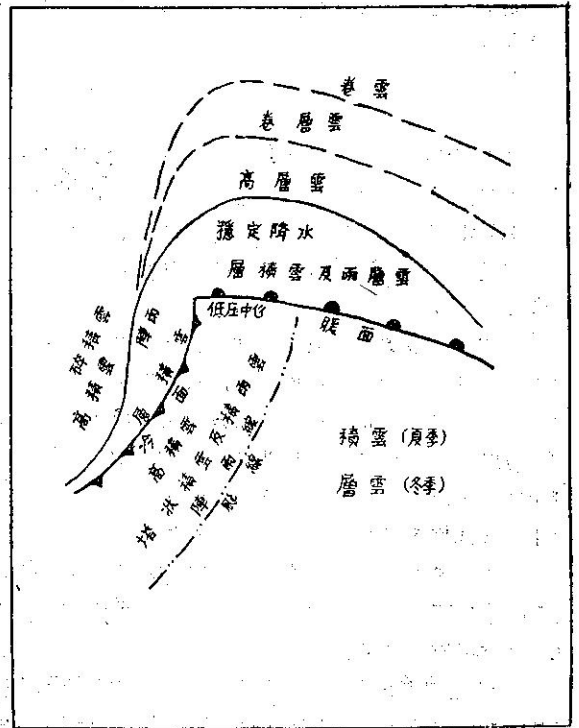
下面將扼要說明運用各種觀測資料的方法，有些地方不免使讀者感到含混籠統。須知這裡僅不過指出衛星資料實際運用應該研究的途徑。最後的分析方法還得靠所有資料的配合。此處僅就現有知識把每種觀測作為一種單獨的數量。並且假設衛星資料為僅有的資料來源，事實上當然還有其他正常觀測和它的連貫性可資參考。以下僅分析當時天氣，因為這是任何預報的第一步工作。

(一) 雲之分析 從衛星上所得到的資料用於目前分析雲的技術，將會遭遇到下面兩個問題。

1. 從上面向下看雲或從下面向上看雲，其間相關的程度目前還沒有確實瞭解。以地面觀測來說，高雲常被低雲所遮蔽。相反來說，從衛星上觀測，高雲常遮蔽了地面能夠看到的較低雲。再者，在高空觀測雲，以往的經驗太少，我們無法斷言上面看雲是否較下面看雲更不易識別不同的雲狀。研究若干從高空火箭攝得雲的照片，證知此雲狀識別問題可能不如想像之嚴重。然而這種火箭資料都在亞熱帶地區，該處對流雲狀盛行，而識別問題主要還在各式層雲或成層的雲。此在高緯度比較普遍，前面已經說過，迴射資料當有助於雲之辨識。
2. 第二個問題在於最近數十年來對於雲的分析，無論在理論上或在實作上都把它忽視了。預報員大多數不關心雲的報告，因此我們在這方面的知識比較落後，今後要從根本上對雲加以研究。

我們相信倘有大量適於研究用的紀錄，從事一項發展計劃可能會得到一種方法，使分析人員根據風暴系統相偕的一般雲型出現情況，迅即獲知周圍的風、溫度、和氣壓場。當然，這種推斷尚需其他直接和間接的觀測加以進一步之修正。

我們都知道低壓區倘和界面相偕，常可發現有組織之雲系。例如發展之低氣壓，其雲系如圖二所示。當然，實測之雲狀和雲量也不免有偏差，有時甚至相差很遠。但大部氣旋根據觀測得的



圖二。一界面波之氣旋周圍降水及雲之典型分佈

的雲系就能識別。雷達觀測決定的降水型對於這種識別極有幫助。系統一經確定，根據雲型就可以大致決定低壓內部和周圍的界面位置，以及氣壓、風、溫度之分佈情形。

以上僅不過根據雲來辨識天氣範式的一個示例，而且並非衛星測雲的唯一用途，其他例證包括：

- (1) 雲狀（特別是積狀雲還是層狀雲）有助於決定氣團的穩定性和氣團類型。
- (2) 倘能自衛星觀測決定塔狀積雲的坡度，則此坡度足以表示水平風的垂直風切方向和強度，亦可顯示水平向溫度梯度。此外，倘風切甚強，此風切有平行於風的趨勢。
- (3) 積雲的方位常發現屬平行之帶狀，即稱「雲街」，排列和風平行。何勃脫(Hubert)和勃格(Berg)研究火箭照相後認為此點極有價值。
- (4) 謝佛(Schaefer)等認為某種形式和方位的雲與激流(jet stream)相偕，因而可以靠這種雲來發現激流並且確定它的位置。
- (5) 李格達(Ligda)認為積雨雲砧的遺跡可能是基本的凝結中心核和新生降水區的最初機構作用。倘能追蹤並計算這種卷雲遺跡的路徑，只要它們到達一個天氣圖上有利區域，就能報出未來降水區的位置。這種預報方法在實際應用上，必須確實瞭解經常產生積雨雲的地區。因此衛星資料可輔助地面雷達觀測之不足，對海岸上和缺乏報告的荒僻地區更有幫助。

- (二) 雲之移動 如果能够決定雲的移動，最主要的用途當在指示氣流動向。此種高空風資料可直接用於飛機領航。風和氣壓梯度既具有密切關係，因此這種資料可能幫助決定氣壓型。氣流或氣壓型一經確定，就可以按目前應用的技術加以應用。例如地面氣壓系統有被它上面氣流旋轉的趨向。

即使將來能發展一種方法可以得到雲向雲速，其間仍不免有所限制。前面已經說過觀測雲之移動和風不同，而雲向雲速的價值又要看能否確定它的高度而定。好在同一高度的風有維持方向上固定不變的趨勢，尤其是在對流上層和較低之平流層。我們知道有溫度平流的地方，風向當隨高度而改變，因此在較低對流層中任何風向之外延推算都不可靠。此外，無雲之區域無法得到此種資料當然也是缺點之一。

- (三) 地面風資料 不論是根據大氣中雜質的飄流或是從海面狀態推算得此種資料，最主要的用途當在推斷當時之地面氣壓型。

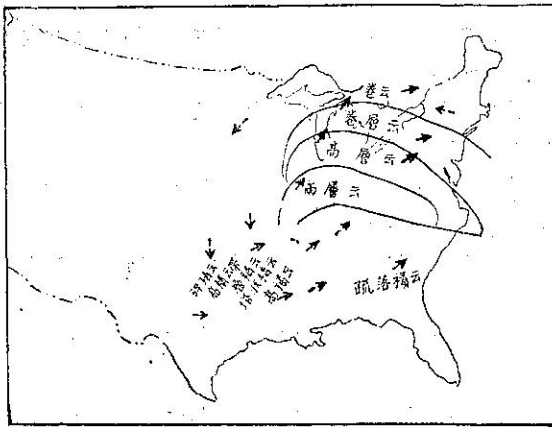
- (四) 對流極限之溫度 赫爾威茲(Haurwitz)採用達因斯(W. H. Dines)的結果指出：對流極限溫度和它高度的相關係數很高，約當負 0.7。較冷之對流極限離地也較高。對流極限的高度屬於氣團的一種特性，熱帶氣團之對流極限較高，寒帶氣團則對流極限較低。

對流極限溫度梯度的變化有助於確定對流極限不連續帶(寒帶和熱帶對流極限之間)的位置。後者又和激流密切關聯。假定此不連續帶為一封閉之圓形，常足以表示當時為一從地面貫穿到整個對流層的冷性低壓區，由此推知為一種逐漸改變而並不活躍的天氣型式。

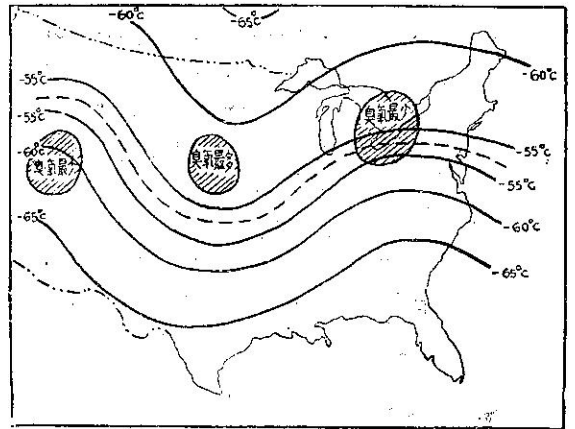
- (五) 垂直溫度投影 倘有很多層次有用的溫度，便能得到垂直方向的溫度投影曲線，因而推知大氣層的穩定性。從溫度還可以推想風。因為在多種情況下，尤其是在對流上層，風大致和等溫線平行。水平向溫度梯度必定和風的垂直切力密切關聯。
- (六) 水氣總含量 上面已經說過水氣含量對於識別氣團並追蹤它每天的行動很有幫助。此外，瞭解水氣情況有助於推斷：某種天氣圖情況下，雲和降水之增加是否能使氣壓系統增強。
- (七) 臭氧總含量 克萊格(Craig)曾論及：臭氧之最大集中區常和對流上層的低槽在一起，最少區則與高脊相偕。
- (八) 雷達觀測 雷達觀測除用以辨認和確定天氣圖系統的位置外(如圖二)，降水區之增減並可顯示一定系統之增強還是減弱。

## 七、綜合分析技術示例

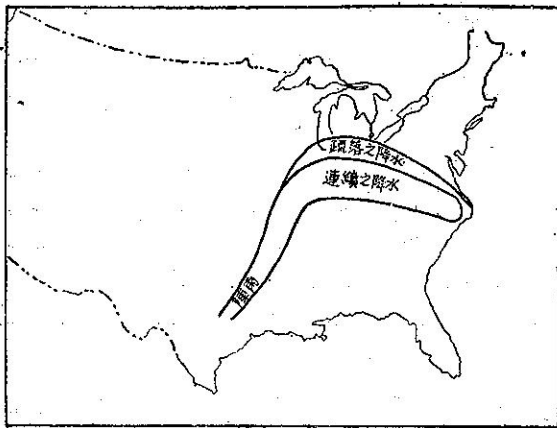
本節將提出一個已經簡化的理想例證，以示上述技術的工作途徑。但在實際工作中，由於自然界之複雜性和多變性，勢必會產生很多困難，此在本節內將無法顧及。再者，本例係以目前情況為據，將來可能會發展更準確的分析方法，其結果自當更為完善。



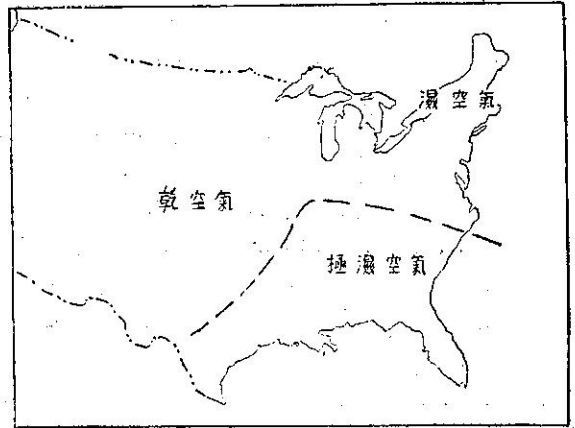
圖三. 雲及風之資料



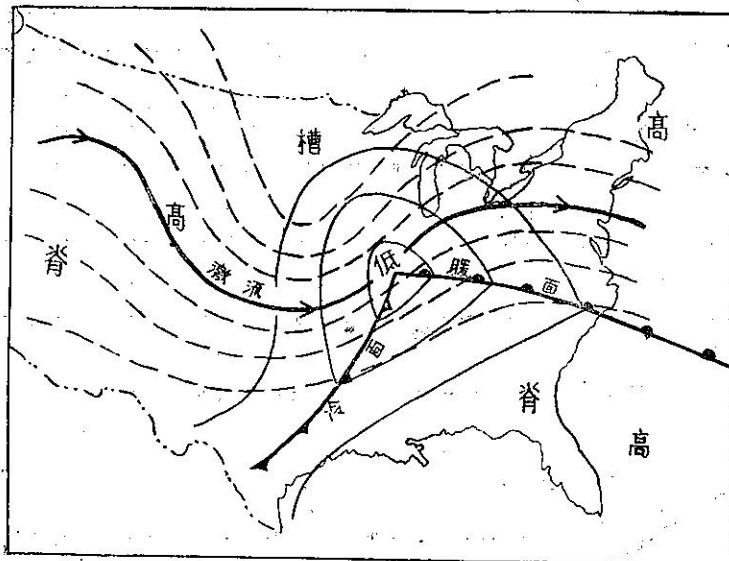
圖四. 對流極限之溫度及臭氧資料



圖五. 降水資料



圖六. 濕度資料



圖七. 根據圖三、四、五、六之分析

圖三表示衛星在某日觀測得雲和風的資料。箭頭表示風向，實線箭頭係根據雲之移動而得到的高空風；虛線箭頭係根據大氣中雜質飄流所推斷的地面風。圖四表示同一時間之對流極限溫度和臭氧最多區最少區的位置。斷線表示對流極限斷裂帶的大概位置。注意：此線以北，對流極限的溫度向北遞減；此線以南溫度向南遞減。圖五表示雷達所觀測得之降水型。圖六表示大氣濕度的分佈情況。

圖七為根據圖三、四、五、六所推斷之天氣分析。圖中已表明冷面暖面和激流之位置，實線表示一般地面氣壓型，斷線為對流上層之氣壓型。此一分析之依據簡述如下：

- (1) 界面位置 根據雲和降水型得出，邊界線係參考不同之水氣含量而加以確定。
- (2) 地面等壓線和氣壓型 根據地面風資料和該種界面系統所常見之氣壓型而定。
- (3) 高空氣壓型 據臭氧資料決定槽脊線位置。另參考雲之移動、激流之方位、並自平行於對流極限之等溫線而確定。
- (4) 激流 根據對流極限溫度和它的斷裂帶而決定。

#### 八、研究計劃所需之資料

目前亟需一種利用衛星觀測以從事天氣分析預報的研究發展計劃，它的目的在於使人造衛星一經傳播，氣象資料即能予以應用。換言之，我們希望第一次發射以氣象為主的衛星時，下面就有一小組預報人員在等着應用這種衛星觀測資料。

首先我們要模擬衛星上可能得到的資料，針對它來發展應用上最理想的途徑。火箭探測所得的資料一般來說自較接近，但事實上並未全部解決，尤其因為現在的火箭發射區都在亞熱帶，不能得到十足代表性的資料。

我們認為模擬衛星所得氣象資料，似可循下述途徑解決：有些飛行高度很高的照相偵察機倘能執行計劃數年，搜集高空觀測資料，對高空向下所見的雲加以照相，觀測雲之迴射，和大氣之透明度等。根據這些資料和照片即可製成類似衛星上所攝得之鑲嵌照片。

另外需要一種研究發展計劃和試驗，針對從事輻射觀測所必需的感應部分。我們深信此類資料的感應部份，大多可以從標準氣象觀測和目前以地面為基礎的研究用觀測中得到。

根據雲之移動、大氣雜質之飄流、或自海面狀態而得到風之資料，從地面標準氣象觀測中即可獲得概念。當然，研究從衛星直接觀測的各種因子和風本身的關係仍屬需要。

積雪報告屬於地面標準氣象觀測的一部份，模擬當無問題。

對流極限（或其他層次）的溫度和大氣中水氣總含量可以從標準無線電探空中摘取或另外計算。

臭氧資料目前尚無有效的正常觀測，只有以研究為目的的少數觀測地點。

假想衛星上雷達觀測所得資料，應該和實際降水資料相比較，後者可自壓溫報告中得到，或者把氣象雷達觀測作為假想的解答。

根據上面這些模擬的資料可能會得到合理的結果，但真正要把衛星資料用於預報還得研究實際從衛星上得到的資料。因此在衛星發展的初期或是任何高空氣象探測之工具，必須儘量得到各種氣象資料以補救假想資料之不足。

#### 九、衛星觀測對天氣預報之價值

人造衛星所得氣象資料之直接應用當然在天氣分析方面，因此我們可以想像到某些報告稀疏的地區（例如在海洋上）當最富有價值。即衛星觀測的價值和天氣報告的密度成反比例。對於資料已經很豐富的地區（像北美陸上）是否還有價值很成疑問。然而這種地區衛星所搜集得的資料倘用在一種專為增進對大氣基本知識的研究而設計的計劃，却極有價值，因為由此可增進我人預報的能力。

根據衛星資料從事預報的顯著成果，當在增進報告稀少地區的預報準確率。對於目前報告稠密地區的預報準確率也會產生相當作用。我們都知道報告稠密區的預報準確率難免受報告稀疏地區的影響，特別是稀疏區在它中緯度的西部。這種影響預報期限愈久則愈顯著。舉例來說，我們設想衛星資料將會增加美國西部和極東岸之24小時預報準確率，但對東部內地的24小時預報却很少幫助。以較長時期的預報來說，衛星資料當有助於所有地區，除非遭受到長期預報的其他限制。

以衛星資料發展的「量」來說，我們懷疑它所提供海洋區資料連同各該區的地面和高空測站，能否達到美國陸上資料那樣豐富。換句話說，上例中衛星對太平洋的觀測不能使舊金山的24小時預報較之聖路易目前的24小時預報更為準確。

我們必須指出衛星將來的發展，對預報的幫助必定遠較上面所述為多。我們深信如果靠衛星能夠對大氣的瞭解有根本上或目前無法預料到的改變，或者因為發展了一種新的預報技術它所需要的資料特別適於衛星觀測，則人造衛星之用於預報必定有它更輝煌的成就。（完）

原文題目：“Utilization of Satellite Observations in Weather Analysis”

原文刊載：Bulletin of the AMS, Nov. 1957