

短波紅外線雲圖之特徵

苟潔予 林春長

氣象衛星中心

中央氣象局

摘要

氣象衛星因不受地形之限制，對於大氣中雲系變化的偵測佔有很重要的地位。由於 NOAA 繞極軌道氣象衛星與 GMS 地球同步氣象衛星之觀測儀器不同，對於雲系變化的偵測亦有所差異。NOAA 繞極軌道氣象衛星所攜帶的「極精密高解像輻射計(Advanced Very High Resolution Radiometer: 簡稱 AVHRR)」利用五個頻道同時偵測大氣。其中第三頻道波長範圍自 $3.55 \mu\text{m}$ ~ $3.93 \mu\text{m}$ 為短波紅外線頻道；此波段白天受陽光影響極大，與 GMS 地球同步氣象衛星以紅外線頻道觀測的結果不同，尤其是冰晶及水滴的觀測。本文研究 NOAA 繞極軌道氣象衛星所攜帶的極精密高解像輻射計中第三頻道短波紅外線雲圖的特徵。結果顯示：由於第三頻道在夜間不受太陽輻射影響，且雲系的亮度溫度又接近地表溫度，所以夜間第三頻道雲圖中雲系層次較不明顯，不如第五頻道雲圖中雲系層次分明。不過第三頻道雲圖對於海、陸界線的分辨較第五頻道佳，尤其是冬季時更為清楚。由於日間第三頻道受到反射太陽光的影響，明顯的反射率和深對流中冰晶的大小與第三頻道波長相近等因素，使得日間第三頻道短波紅外線雲圖的色調較不同於一般紅外線雲圖。所以利用日間 NOAA 衛星第三頻道雲圖中色調之差異可判別對流的位置及強弱並有助於雲圖的分析研判及豪(大)雨的即時預報。除此之外第三頻道雲圖亦具有辨別地形的功能。第三頻道短波紅外線雲圖特性不同於地球同步氣象衛星的紅外線雲圖，氣象人員在分析時須注意其特性以有助於天氣現象之分析及預報。

一、前言

自1960年4月第一枚繞極軌道氣象衛星TIROS-1昇空作業，將空間上高解析度觀測資料送回地面接收站，以供天氣分析和預報參考。由於衛星不受地形影響，可彌補傳統地面觀測、高空觀測及雷達觀測之不足，因此氣象衛星已被氣象學家公認為最佳觀測工具之一：氣象人員利用氣象衛星雲圖可以偵測及監視颱風及劇烈天氣系統，而氣象衛星上所攜帶的輻射資料可以求出水汽和氣溫的垂直分布及海面溫度等。由雲圖上雲塊的移動可計算風向和風速，以補足海洋地區觀測資料的缺乏。因此，在預報作業中，衛星是不可缺少的分析工具。

NOAA 繞極軌道氣象衛星平均飛行高度約 850 公里，繞地球一週需時 102 分鐘，每天通過地球上某一定點附近上空 2 次，解析度(resolution)達 1.1 公里。

其所攜帶的「極精密高解像輻射計」(Advance Very High Resolution Radiometer, 簡稱 AVHRR)，利用五個頻道(表一)同時偵測大氣，可獲得可見光和紅外線雲圖。第一頻道的波長範圍 $0.58 \mu\text{m}$ ~ $0.68 \mu\text{m}$ 屬可見光頻道(表二)，拍攝可見光雲圖(圖1)；所拍攝雲圖與地球同步氣象衛星 GMS 的可見光頻道 $0.5 \mu\text{m}$ ~ $0.75 \mu\text{m}$ (圖2)相近。第二頻道的波長範圍 $0.725 \mu\text{m}$ ~ $1.1 \mu\text{m}$ ，拍攝近紅外線雲圖(圖3)。第三頻道的波長範圍 $3.55 \mu\text{m}$ ~ $3.93 \mu\text{m}$ ，拍攝短波紅外線雲圖(圖4)，第四頻道的波長範圍 $10.3 \mu\text{m}$ ~ $11.3 \mu\text{m}$ 與第五頻道的波長範圍 $11.5 \mu\text{m}$ ~ $12.5 \mu\text{m}$ 皆屬遠紅外線頻道所拍攝雲圖(圖 5、6)與地球同步氣象衛星 GMS 紅外線頻道 $10.5 \mu\text{m}$ ~ $12.5 \mu\text{m}$ 雲圖相近(圖7)。AVHRR 白天利用五個頻道(Channel 1 ~ Channel 5)同時觀測，而夜間只有三個頻道(Channel 3 ~ Channel 5)可同時觀測。

AVHRR的第三頻道（短波紅外線頻道， $3.7 \mu\text{m}$ ）陽光反射影響極大，受水汽吸收的影響較小，其反射性質和第一、二頻道不同。由於冰晶的反射率小於水滴的反射率，因此可在白天第三頻道的雲圖上區別雲和雪(Kidder and Wu, 1984)。Hunt (1973) 認為對相同厚度的雲而言，觀測頻道的波長愈小則放射率愈小，透射率愈大，因此在 $3.7 \mu\text{m}$ 頻道所偵測到雲的放射率低於 $8.5\text{-}13 \mu\text{m}$ 頻道所偵測到的。另當雲系中水滴含量愈多則透射率愈小，而反射率愈大。白天時由於受到太陽反射影響，短波紅外線頻道所偵測的雲頂反射率大於遠紅外線頻道所測。夜間可利用放射率的差異併用第三頻道及第四頻道，自地面或洋面分辨霧或低雲(Eyre et al, 1984)。Stevak et al (1991) 利用“捷克水文氣象研究所”(Czech Hydrometeorological Institute, 簡稱 CHMI) 發展的第三頻道反射率計算方法，分析深對流時發現由於白天受太陽輻射影響對流雲頂的色調較周圍雲系為暗。Arking and Childs (1985) 研究粒子大小與反射率的關係時認為當粒子大小接近第三頻道波長時會有較高的反射率。當對流雲系反射率增強時，旺盛的上衝氣流會產生大量且非常小的冰晶粒子（約 $2\text{-}4 \mu\text{m}$ ，接近第三頻道的波長範圍），因此會增強反射率。若不考慮太陽輻射則第三頻道的亮度溫度比第四頻道更接近地表溫度，所以夜間第四頻道較易偵測到雲。

本文根據前述理論及成果，研究AVHRR中第三頻道（ $3.7 \mu\text{m}$ ）雲圖的特徵及其對於天氣分析時之應用，可為氣象人員利用衛星雲圖時之參考，並增進衛星雲圖的分析研判能力，期對天氣預報有更佳之輔助。

二· AVHRR第三頻道的特性

(一)原理

根據能量守恆之原理，吸收率 (A)、反射率 (R)、和透射率 (T) 三者之間關係如下：

$$A + R + T = 1 \quad (1)$$

而由Kirchhoff定律可知

$$E/K = B(T) \quad (2)$$

(2)式中 E 表放射係數，K 表吸收係數， $B(T)$ 表黑體輻射強度。在熱力平衡下，可推得一物體的吸收率和放射率 (ϵ) 相等

$$A = \epsilon \quad (3)$$

由 (1)、(3) 式可得：

$$\epsilon + R + T = 1 \quad (4)$$

亦即在探討雲層的輻射值時須同時考慮放射、反射及透射三種參數。對於非常密實的雲而言，雲表面可視為一漫反射面，則假設其透射率為零，因此 (4) 式變為

$$\epsilon + R = 1 \quad (5)$$

即衛星觀測的輻射強度包含物體(雲層)本身的放射量及反射太陽光的量。

(二)特性

1. 比較 $3.7 \mu\text{m}$ 及 $11 \mu\text{m}$ 兩個頻道陸地及水面之放射率和反射率 (表三) 可知：就 $3.7 \mu\text{m}$ 而言，陸地及水面反射率皆大於放射率，尤以水面最顯著。但以 $11 \mu\text{m}$ 而言，陸地及水面放射率皆遠大於反射率。另就陸地及水面在兩個頻道的放射率相差不大，但水面的反射率遠大於陸地。

2. 地表放射率效應：假設衛星觀測的輻射量只有來自地表的放射，而不考慮太陽反射效應則

$$I_{\nu} = \epsilon B_{\nu}(T_s) \quad (6)$$

(6)式中 I_{ν} 是衛星觀測的輻射量， ϵ 是放射率， $B_{\nu}(T_s)$ 是 Planck 函數， T_s 是地表溫度。假設 $T_s = 300^{\circ}\text{K}$ ， $\epsilon = 0.5$ ，則由 (6) 式分別計算 $3.7 \mu\text{m}$ 及 $11 \mu\text{m}$ 頻道所觀測到的輻射強度為

$$\begin{aligned} I(3.7 \mu\text{m}) &= 0.5 B(3.7 \mu\text{m}, 300^{\circ}\text{K}) \\ &= 0.276 \text{ mW/m}^2 \text{ - cm}^{-1} \text{ - sr} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} I(11 \mu\text{m}) &= 0.5 B(11 \mu\text{m}, 300^{\circ}\text{K}) \\ &= 57.9 \text{ mW/m}^2 \text{ - cm}^{-1} \text{ - sr} \end{aligned} \quad (8)$$

可推得 $T_b(3.7 \mu\text{m}) = 285^{\circ}\text{K}$ ， $T_b(11 \mu\text{m}) = 259^{\circ}\text{K}$ ，可知 $T_b(3.7 \mu\text{m})$ 較接近地表溫度 300°K 。因此，如果上升輻度強度只考慮地表放射時，在相同放射率的情況下， $3.7 \mu\text{m}$ 的亮度溫度比 $11 \mu\text{m}$ 的亮度溫度更接近地表溫度。由於 $11 \mu\text{m}$ 頻道中雲與地表溫度對比較 $3.7 \mu\text{m}$ 大，因此拍攝雲圖時第四頻道 ($11 \mu\text{m}$) 較容易分辨雲和地表的差異。

由以上推論可知：第三頻道 ($3.7 \mu\text{m}$) 白天受陽光反射影響；垂直發展較高的雲因反射值較大所以會有較大的輻射量，而在雲圖中色調反較四周圍發展較低的雲系為暗。夜間 $3.7 \mu\text{m}$ 頻道雖不受陽光影響但亮度溫度較接近地表溫度，因此以辨雲率而言， $11 \mu\text{m}$ 頻道的辨雲率較 $3.7 \mu\text{m}$ 為佳。

三·雲圖特性

(一) 夜間第三頻道雲圖特性

由於太陽輻射形成的反射效應在夜間消失，此時衛星攜帶的輻射計僅能接收到物體的放射量，而第三頻道雲層的亮度溫度又比較接近地表溫度，因此比較1994年1月7日2024UTC的第三頻道雲圖(圖8)與同時間第五頻道雲圖(圖9)相較可知：夜間第三頻道雲圖上雲層的層次亦不易辨認；相對而言，第五頻道雲圖中雲層的層次分明，雲的分辨率較佳。因此於夜間分析NOAA雲圖時須注意此項特性。

夜間地表放射量隨著季節的變化亦會表現在第三頻道的雲圖上，比較1994年1月7日2024UTC(冬季)第三頻道雲圖(圖8)及1994年7月15日1120UTC(夏季)第三頻道雲圖(圖10)可知：夏季太陽輻射對地表的加溫作用使得入夜後地表與雲間的放射量差異較大，因此夏季夜間第三頻道雲圖(圖10)的分辨率高於冬季(圖8)；而由於夏季海、陸溫差不若冬季明顯，因此冬季時海、陸界線(圖8)較夏季時(圖10)明顯。

比較與圖10同時間的第五頻道雲圖(圖11)可知：夏季夜間第三頻道雲圖的層次不如第五頻道。因此不論季節變化，夜間第三頻道雲圖的辨雲率不如第五頻道雲圖明顯。由以上分析可得下列結果：

1. 夜間第三頻道雲圖辨雲率不若第五頻道雲圖，並不受季節變化影響。
2. 夏季夜間第三頻道雲圖的辨雲率高於冬季夜間。
3. 冬季夜間第三頻道雲圖的海、陸界線較夏季夜間清楚。

(二) 日間第三頻道雲圖特性

由(5)式可知日間第三頻道所接受到的輻射量包含反射量及放射量，所以日間第三頻道雲圖和夜間第三頻道雲圖有很大的不同。

圖12是1994年1月7日0754UTC第三頻道雲圖，圖上顯示低層雲由於水滴含量多，反射率較高層雲大。雲圖上顯示的色調較中、高層雲為暗，與同時間第五頻道雲圖(圖13)相比可知其差異。比較日間(圖12)與夜間(圖8)雲圖，由日間雲圖的層次分明與夜間雲圖的對比不明顯，可以瞭解太陽輻射對於第三頻的影響極大。

比較冬季日間第三頻道雲圖(圖12)與夏季日間第三頻道雲圖(1994年7月15日0749UTC，圖14)可知，日間

第三頻道雲圖隨著季節的變化並不明顯，因為第三頻道受陽光反射的影響遠大於物體本身的放射量。

比較夏季日間同時間的第三頻道雲圖(圖12)和第五頻道雲圖(圖15)，所得的結果和冬季夜間同。由以上分析顯示：

1. 日間第三頻道雲圖與第五頻道雲圖皆具有較佳的辨雲率。
2. 日間第三頻道雲圖的辨雲率高於夜間第三頻道雲圖。
3. 季節變化對於日間第三頻道的影響並不明顯。

(三) 日間第三頻道雲圖中對流雲系的特徵：

如前述，夜間第三頻道僅受放射率影響，辨雲率不佳；日間第三頻道由於陽光反射的影響，伴隨天氣系統的雲系較易分辨。圖16是1994年7月15日2346UTC NOAA-12第五頻道雲圖，圖中顯示：大陸華中一帶位於鋒面系統上有很明顯的對流雲系，沿海一帶亦有小範圍的淺對流正要發展，同時間第三頻道雲圖(圖17)可看到相同的結果。經過太陽加熱8小時後，7月16日0737UTC第五頻道雲圖(圖18)顯示中原位於大陸沿海一帶的對流雲系快速發展，形成明顯的對流胞，此時第三頻道雲圖(圖19)上對流較強的部分色調較暗，顯現色調強化的效果。

深對流雲頂大都由冰晶粒子組成，理論上冰晶的反射率小於水滴的反射率，於第三頻道上所接收的輻射量應小於水滴的輻射量，故應其呈現較白的色調？但由第三頻道雲圖色調的變化可推論深對流雲頂的反射率增加第三頻道接收的輻射量，使其顯現較暗的色調。會有這種不同的結果出現可能如Arking & Childs所提：對流雲頂中旺盛的上衝氣流會產生大量直徑約 $2\sim 4\ \mu\text{m}$ (接近第三頻道的波長)的冰晶粒子，因而有較強的反射率以增加第三頻道所接收的輻射量，使其呈現較暗的色調。圖14有相同的結果。

由以上分析可知日間第三頻道雲圖易於分析研判深對流的位置，由色調的明暗亦可知對流的強弱，有助於雲圖的分析研判及豪(大)雨的即時預報。

(四) 由日間第三頻道雲圖分辨雪與雲

利用冰晶反射率小於水滴反射率的原理，可以很容易從日間第三頻道雲圖中分析出有雪的地區。圖20

是1994年1月6日0626UTC第五頻道雲圖。由圖中可看出我國東北及韓國一帶有色調較暗的低雲存在。分析同時間的第三頻道雲圖(圖21)時發現雲圖上該地的色調較白,因此可推論該地有雪,因為大片的雪地會反射較小的輻射量到第三頻道中。而由圖中亦可清楚看出北韓附近冰雪沿著山脈走向覆蓋。比較稍晚0944UTC(圖22)的第三頻道雲圖此種現象已不明顯。

由以上分析可知:併用日間第三頻道及第五頻道雲圖可分析出冰雪的位置。

(五) 第三頻道雲圖中的地形特徵:

圖23是1994年1月27日1209UTCNOAA-12第三頻道雲圖,由於河流及山脈反射率的差異,可以從雲圖上分辨出河流及山脈的走向。

四·總結

由 R (反射率)+ ϵ (放射率)=1,可知衛星觀測到的輻射量包含反射及放射。第三頻道受陽光反射影響極大,因此日、夜雲圖差異較大。本文研究 NOAA 繞極軌道氣象衛星攜帶的輻射計中第三頻道雲圖的特徵,得到下列結果:

(一) 夜間第三頻道雲圖特性:

1. 冬季夜間第三頻道雲圖不易分辨地表與低雲,第五頻道所拍攝的雲圖效果較佳。
2. 夏季夜間第三頻道雲圖的辨雲率高於冬季夜間,顯示季節變化影響衛星輻射計中第三頻道接收輻射量的多寡。
3. 夜間第三頻道雲圖辨雲率不若第五頻道雲圖,並不受季節變化影響。
4. 冬季夜間第三頻道雲圖的海、陸界線較夏季夜間清楚。

(二) 日間第三頻道雲圖特性:

1. 日間第三頻道雲圖與第五頻道雲圖皆有較佳的辨雲率。
2. 日間第三頻道雲圖的辨雲率高於夜間第三頻道雲圖。
3. 季節變化對於日間第三頻道的影響並不明顯。

(三) 由日間第三頻道雲圖中色調明暗可研判對流的位置及強弱,有助於雲圖的分析研判及豪(大)雨的即時預報。

(四) 併用第三頻道雲圖及第五頻道雲圖可分析出冰雪的位置。

(五) 由河流及山脈反射率的差異,可以從第三頻道雲圖中分辨河流及山脈的走向。

根據以上結果,可知反射率對於第三頻道的影響極大,於分析研判第三頻道雲圖時須注意此項特性。

參考文獻:

- 曾忠一,1983:大氣遙測原理與應用,中央氣象局,衛星氣象訓練教材001號。
- 曾忠一,1988:大氣輻射,聯經出版社,360頁。
- 曾忠一,1988:大氣衛星遙測學,渤海堂文化事業公司,630頁。
- Arking,A.,and Child., 1985: Retrieval of cloud cover parameter from satellite image. , J. Climate Appl.Met.,24,322-333.
- Eyre,J.R.,Brownscombe,J.L.andAllam,R.J., 1984: Detection of fog at night using Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) imagery. Met.Mag.,113,264-271.
- Hunt,G.E.,1973:Radiative properties of terrestrial clouds at visible and infrared thermal window wavelengths.Q.J.R.Met.Soc.,99,346-369.
- Kidder,S.Q. and Wu,H.T.,1984:Dramatic contrast between Low Cloud and Snow in Daytime 3.7 μ m Imagery.Mon.Wea.Rev.,112,2345-2346.
- Smith,W.L., 1980: Meteorological Satellite Application. Course Notes for Meteorology 622, Spring 1980, Dept. of Meteorology, University of Wisconsin, Madison, 110pp.
- Stevak,M.,Doswell III ,C.A.,1991:The AVHRR channel 3 Cloud Top Reflectivity of Convective Storm. Mon.Wea.Rev.,119,841-847.

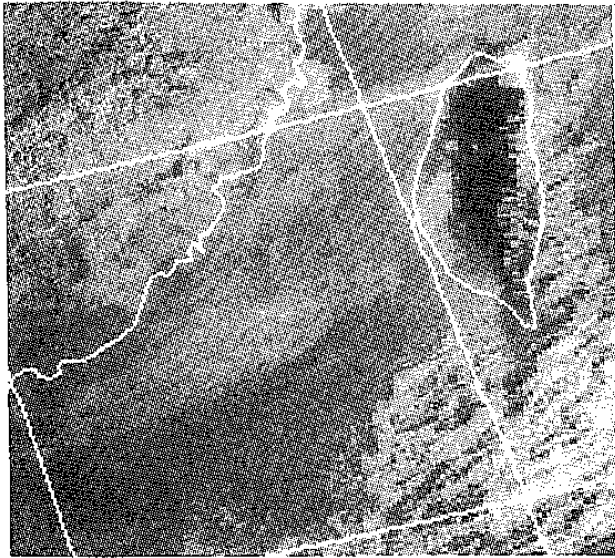


圖 1 1994年1月10日0023UTC
NOAA-11第一頻道雲圖

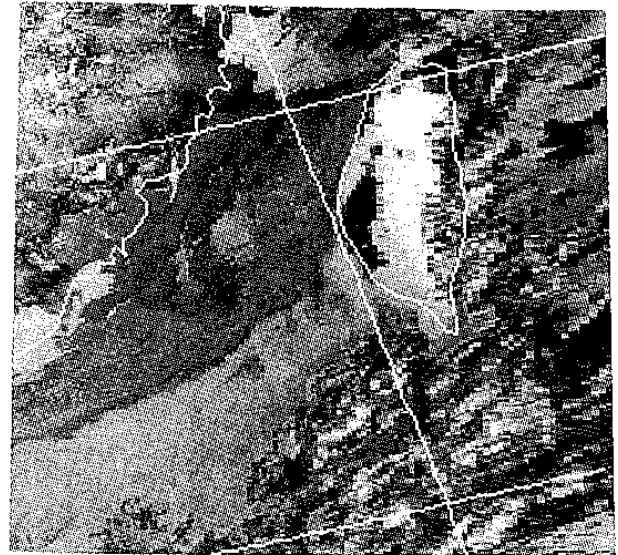


圖 4 1994年1月10日0023UTC
NOAA-11第三頻道雲圖

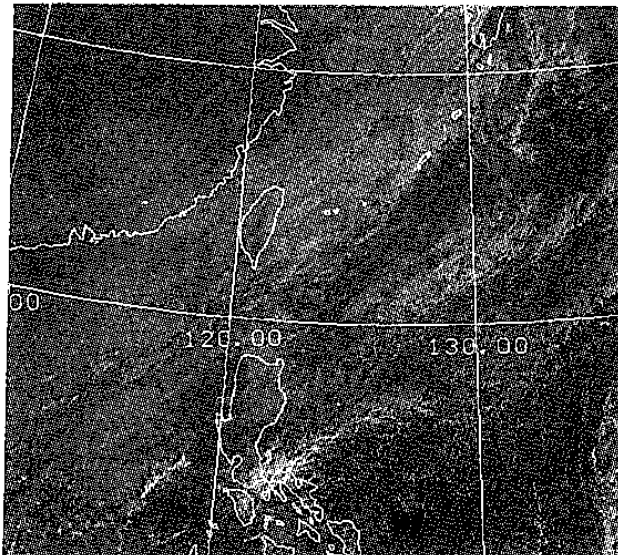


圖 2 1993年12月20日2332UTC
GMS 可見光雲圖

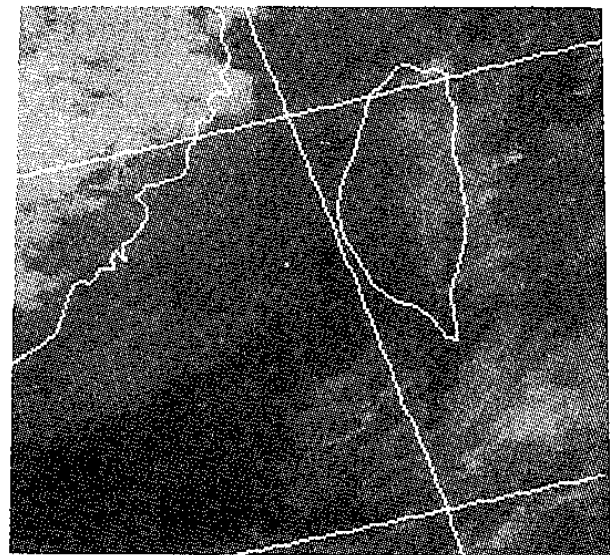


圖 5 1994年1月10日0023UTC
NOAA-11第四頻道雲圖

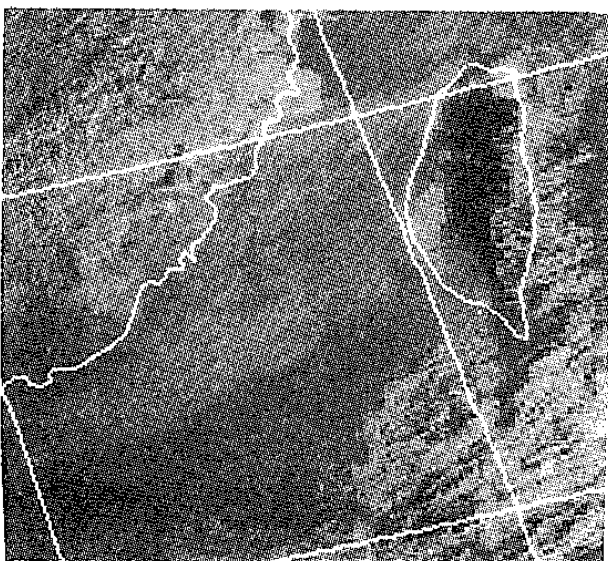


圖 3 1994年1月10日0023UTC
NOAA-11第二頻道雲圖

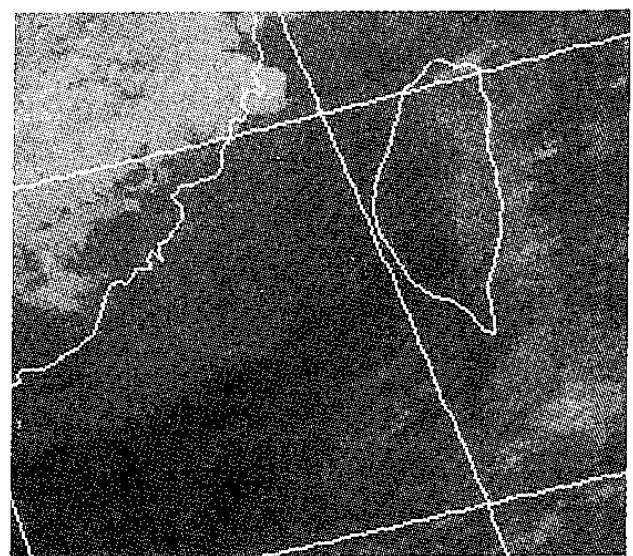


圖 6 1994年1月10日0023UTC
NOAA-11第五頻道雲圖

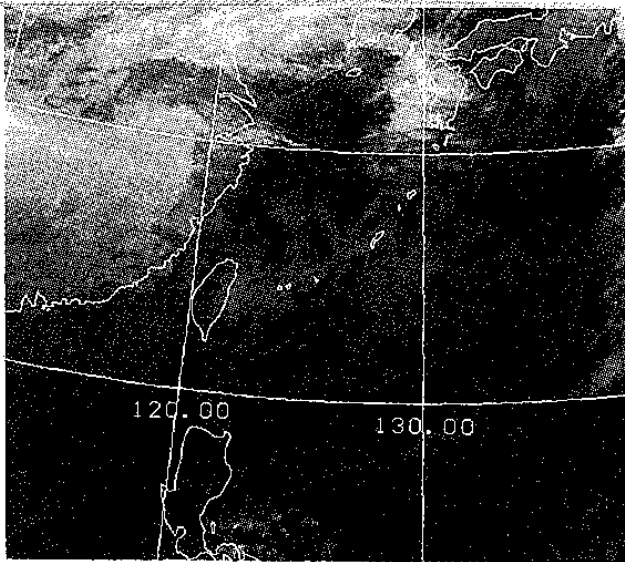


圖 7 1993年12月20日1132UTC
GMS 紅外線雲圖

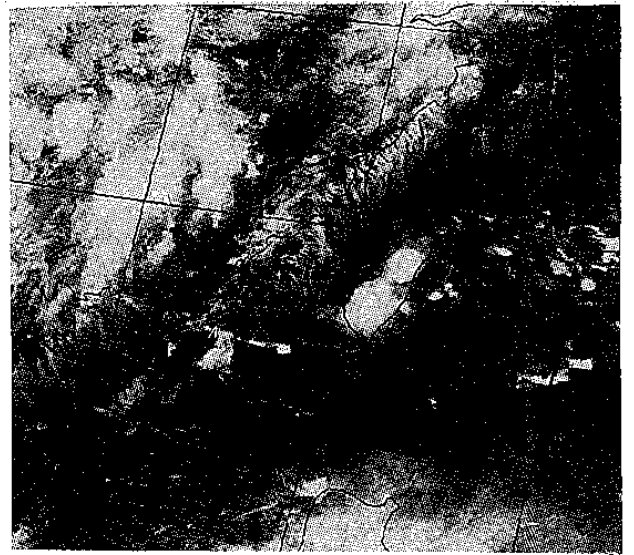


圖 10 1994年7月15日1120UTC
NOAA-12第三頻道雲圖

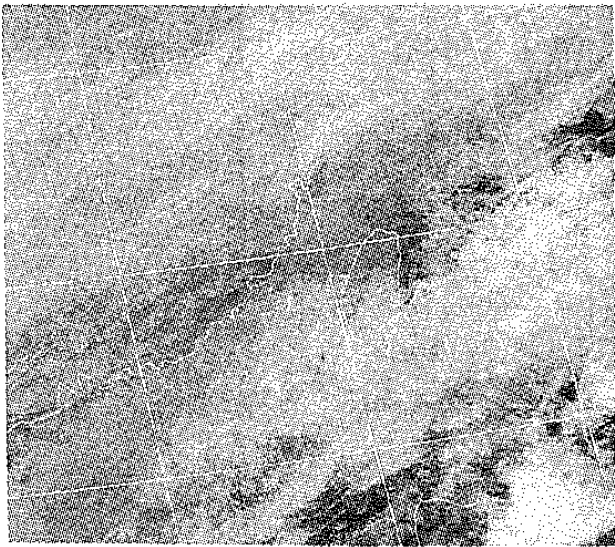


圖 8 1994年1月7日2024UTC
NOAA-11第三頻道雲圖

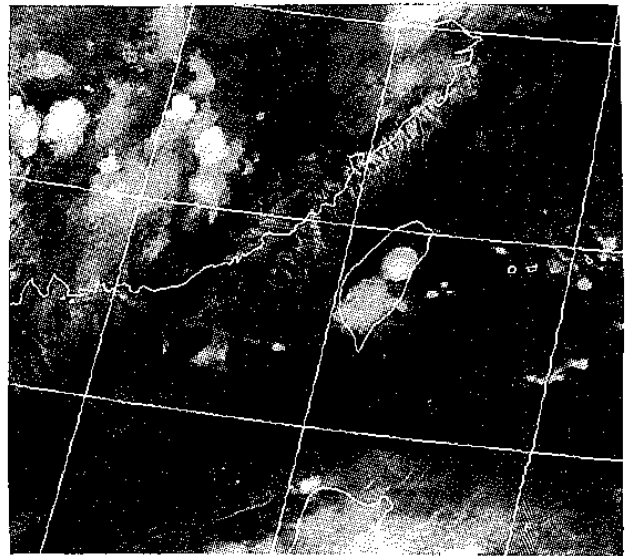


圖 11 1994年7月15日1120UTC
NOAA-12第五頻道雲圖

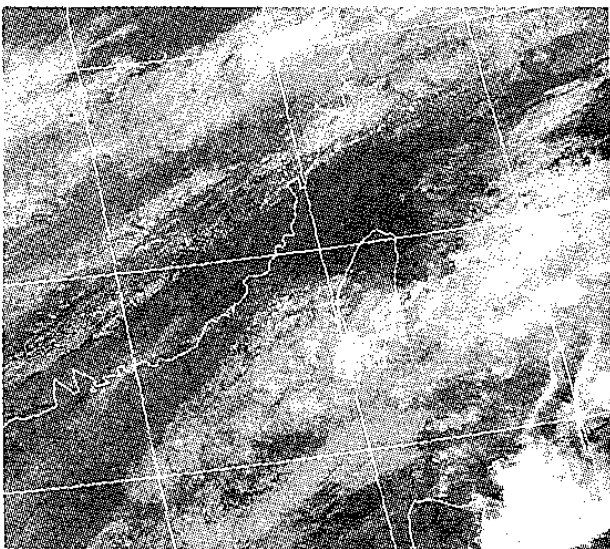


圖 9 1994年1月7日2024UTC
NOAA-11第五頻道雲圖

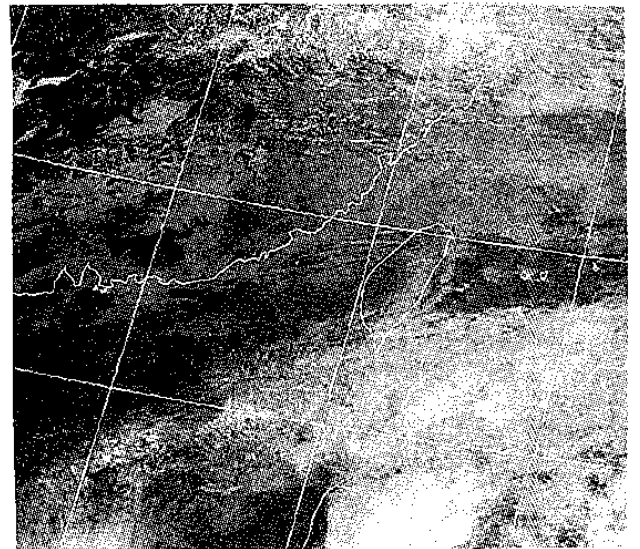


圖 12 1994年1月7日0754UTC
NOAA-11第三頻道雲圖

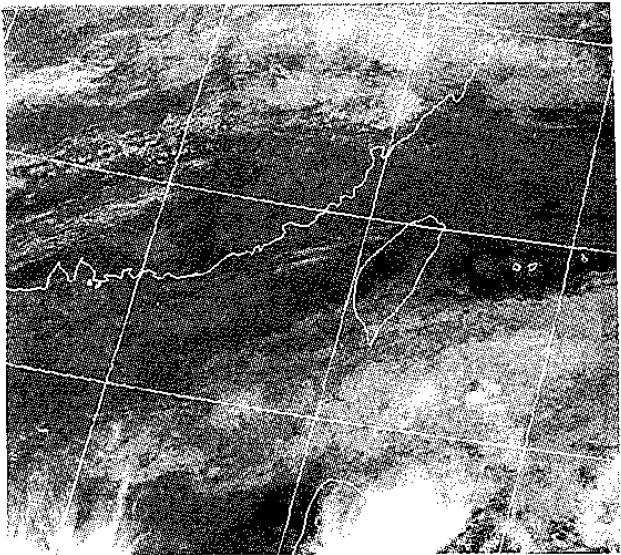


圖 13 1994年1月7日0754UTC
NOAA-11第五頻道雲圖

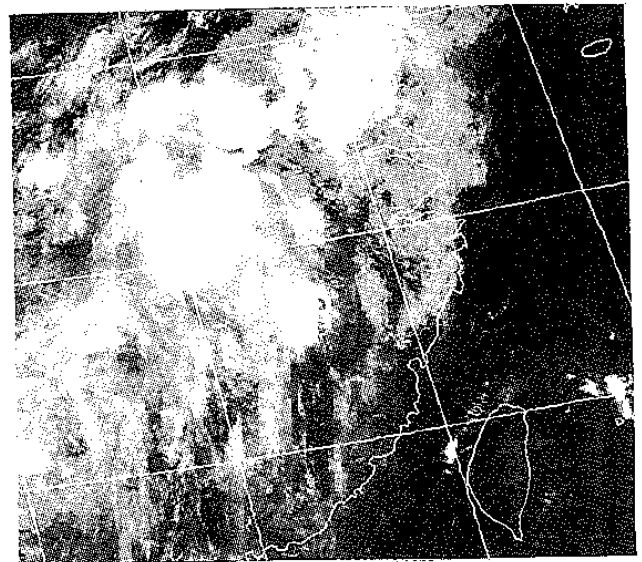


圖 16 1994年7月15日2346UTC
NOAA-12第五頻道雲圖

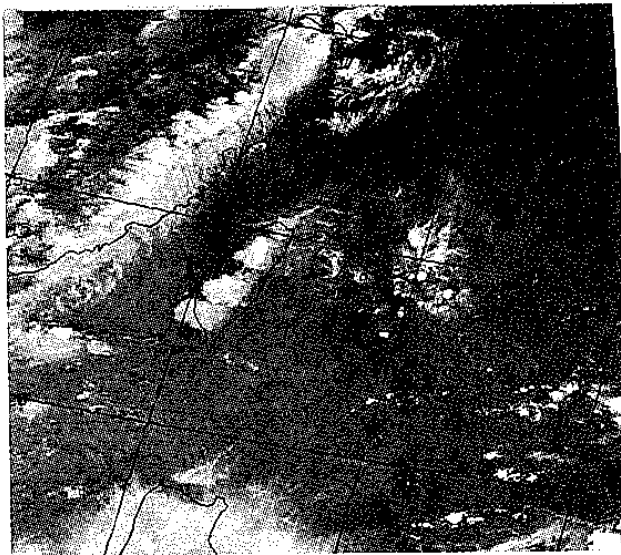


圖 14 1994年7月15日0749UTC
NOAA-11第三頻道雲圖

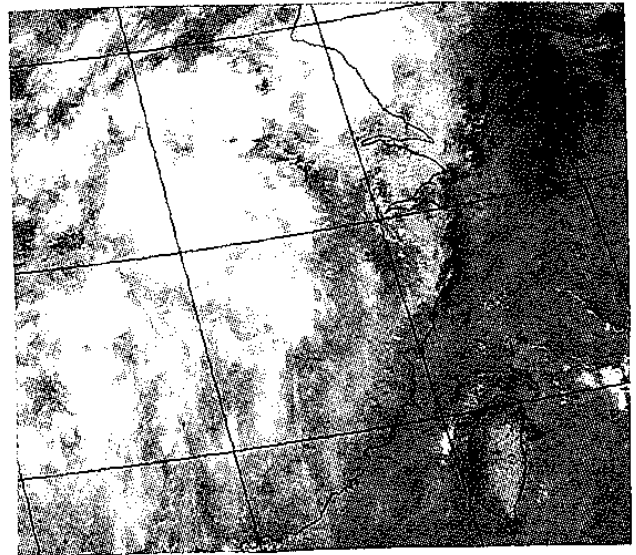


圖 17 1994年7月15日2346UTC
NOAA-12第三頻道雲圖

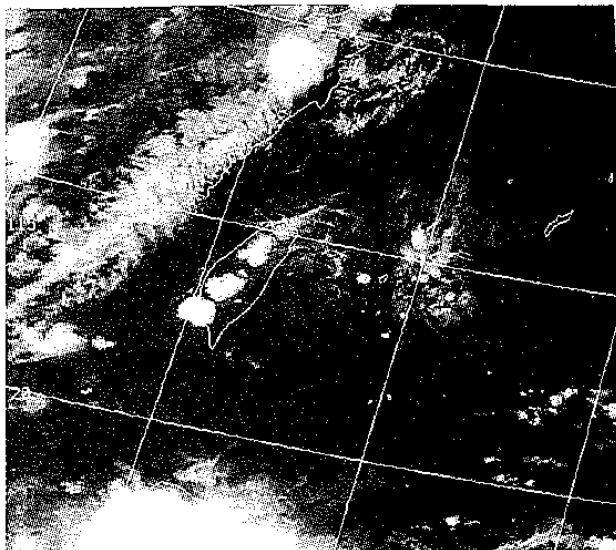


圖 15 1994年7月15日0749UTC
NOAA-11第三頻道雲圖

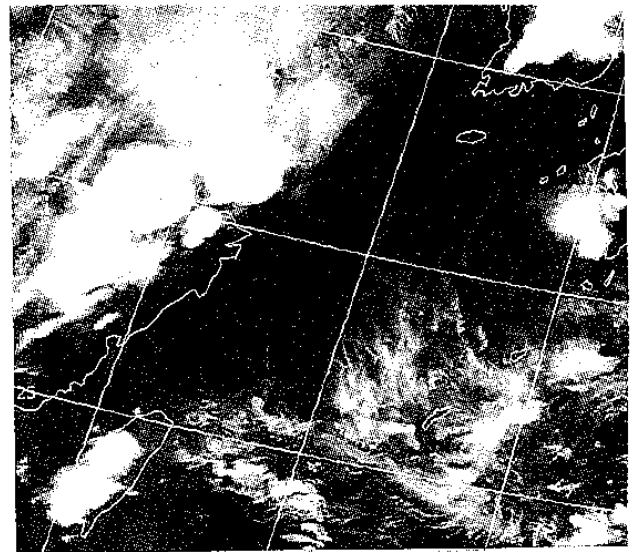


圖 18 1994年7月16日0737UTC
NOAA-11第五頻道雲圖

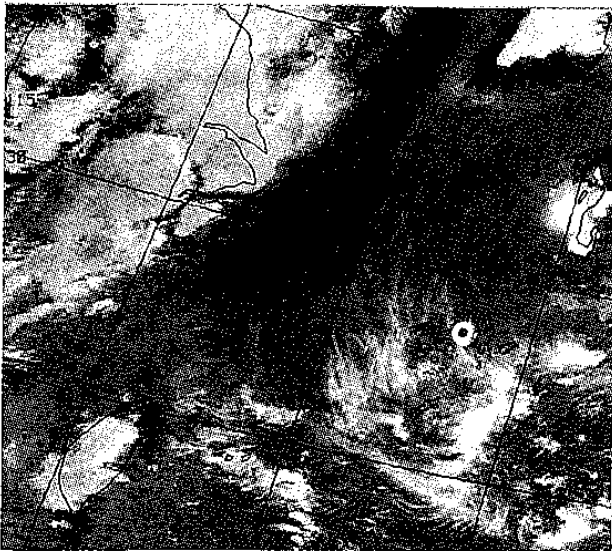


圖 19 1994年7月16日0737UTC
NOAA-11第三頻道雲圖

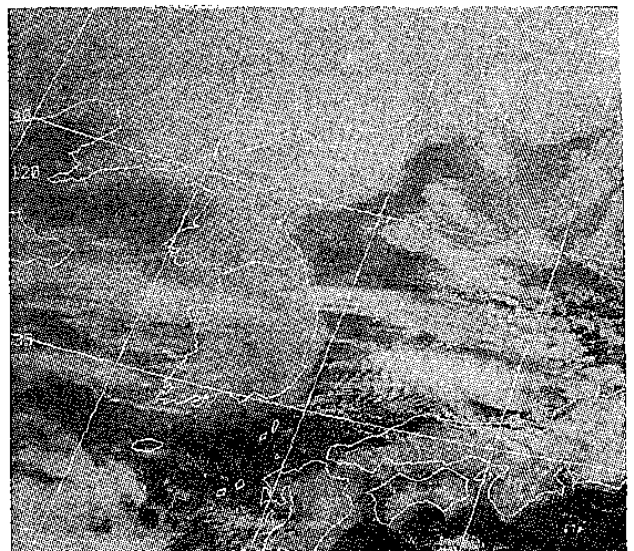


圖 22 1994年1月6日0944UTC
NOAA-12第三頻道雲圖

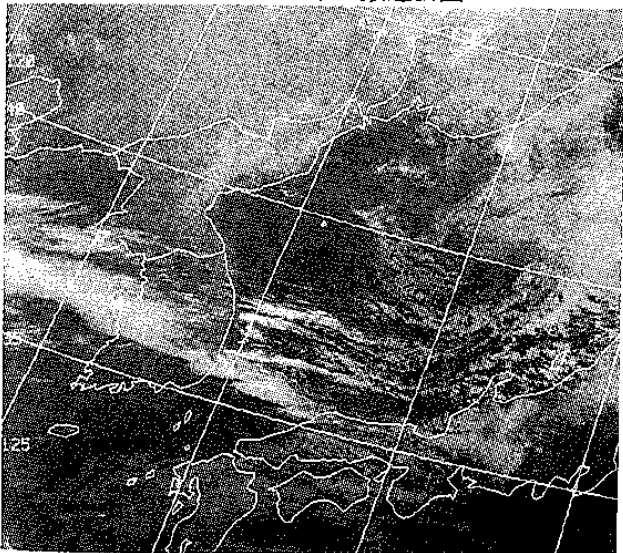


圖 20 1994年1月6日0626UTC
NOAA-11第五頻道雲圖

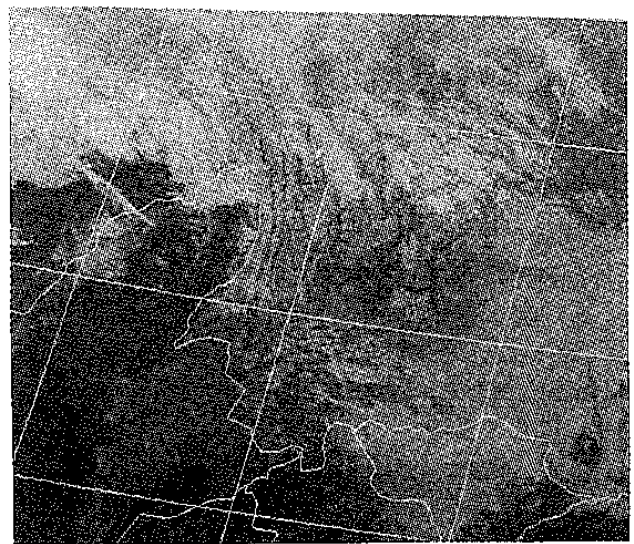


圖 23 1994年1月27日1209UTC
NOAA-12第三頻道雲圖

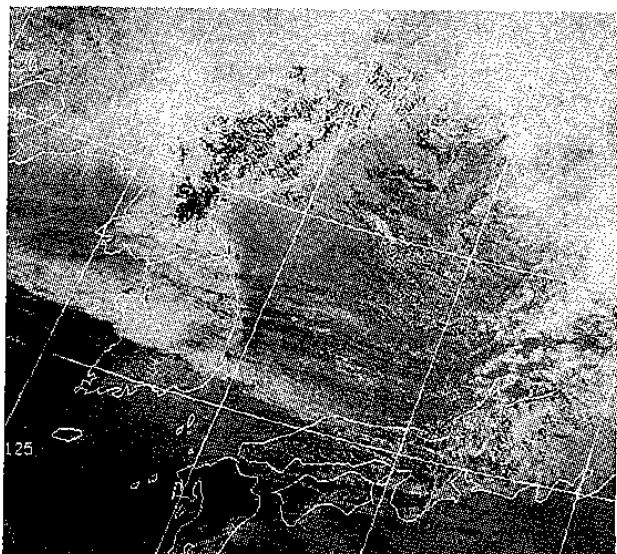


圖 21 1994年1月6日0626UTC
NOAA-11第三頻道雲圖

表一 AVHRR使用的大氣窗區

頻道	波長 (μm)	光譜區域
1	0.58 ~ 0.68	可見光
2	0.725 ~ 1.1	近紅外線
3	3.55 ~ 3.93	紅外線
4	10.3 ~ 11.3	紅外線
5	11.5 ~ 12.5	紅外線

表二 衛星遙測使用的主要大氣窗區

光譜區域	波長範圍	光譜區域	波長範圍
可見光	0.30~0.75 μm	遠紅外光	8.0~9.2 μm
近紅外光	1.0~1.12 μm	遠紅外光	10.2~12.4 μm
近紅外光	1.19~1.34 μm	遠紅外光	17.0~22.0 μm
近紅外光	1.55~1.75 μm	微波	2.06~2.22 mm
近紅外光	2.05~2.4 μm	微波	3.0~3.75 mm
中紅外光	3.5~4.16 μm	微波	7.5~11.5 mm
中紅外光	4.5~5.0 μm	微波	20mm以上

表三 兩個窗區頻道陸地和水面的放射率 (ϵ)
和陽光反射率(R) (Smith 1980)

頻道	ϵ 或 R	陸地	水面
3.7 μm	ϵ	$\epsilon > 0.80$	$\epsilon > 0.90$
3.7 μm	R	$R > 0.90$	$R < 2.0$
11 μm	ϵ	$\epsilon > 0.90$	$\epsilon > 0.95$
11 μm	R	$R < 0.0025$	$R < 0.02$

