

由红外云图上卷云判断高空流场特征变化及其天气系统的发展

陈渭民

一、红外云图上卷云的基本特征

卷云是大气运动的产物，其出现反映了高空流场特征及其相联的大气物理过程。卷云在卫星云图上的主要特征为^{[1][2]}：在可见光云图上，图象的色调决定于各目标物的反照率。由于卷云的反照率很低，一般表现为灰色，有时与四周目标物差异不大，不容易将卷云与其它目标物区分开来。在红外云图上，图象的色调决定于目标物的温度，一般色调愈暗，表示温度愈高，色调愈白，表示温度愈低。由于卷云的云顶温度很低，所以在红外云图上卷云的色调很白，同时卷云顶的温度与环境目标物温度差异很大，所以卷云在红外云图上反映很清楚，很容易将它与其它目标物区别开来。

在卫星云图上，卷云除色调特征外，还表现有结构型式、纹理、卷云的大范围分布等，其中卷云的结构型式可以表现为各种程度的弯曲；卷云的纹理表现为在卷云区四周有纤维性的羽毛状特征，在大片卷云区内出现有一条条卷云线；卷云的分布范围可以相差很大，有与天气尺度相联的伸展几百至几千公里的卷云区，也有与中小系统相联的卷云区。

卷云的上述特征对于资料稀少的高原和海洋区域是十分重要的，它可以弥补这些地区因资料不足造成天气图分析困难的缺陷，同时，对于资料稠密的地区也十分有用，因为卷云的这些特征在常规观测中是无法提供的。

二、卷云云型与高空流场特征

过去人们用红外云图上卷云弯曲程度、卷云线伸展的长度、卷云区伸展的范围、卷云的稠密程度和卷云区的纹理估计对流层上部的流场特征时^[3]，描述云型特征往往因人而异，带有很大的随意性。为使描述较为客观，我们从自然坐标系的涡度方程出发，对云型特征进行讨论，以便更明确地判断高空流场特征。

1. 自然坐标系中的涡度方程

自然坐标系中涡度方程的垂直分量可由两部分组成^[1]：(1)垂直气流方向上的风速改变($-\frac{\partial V}{\partial n}$)，称为切变涡度；(2)沿流线方向上风的转动($\frac{V}{R_s}$)，称为曲率涡度。这两部分的和可写为

$$\zeta = \zeta_s + \zeta_R = -\frac{\partial V}{\partial n} + \frac{V}{R_s} \quad (1)$$

式中 ζ 为涡度的垂直分量， ζ_s 、 ζ_R 分别为切变涡度和曲率涡度， V 为风速， n 垂直于流线且指向流线方向的左方(如流线向东， n 指向北)， R_s 为流线的曲率半径。 $R_s > 0$ ，流线呈气旋性弯曲， $R_s < 0$ ，流线呈反气旋弯曲。

在卫星云图上，由于卷云是冰晶组成的，卷云中的冰晶如同探空测风气球一样起着示踪风的作用，所以我们认为卷云伸展的方向就是高空风的方向，也就是近似于流线方向。同时认为卷云伸展的距离愈长，卷云纹线愈光滑、愈清楚表示高空风愈大。这样，结合方程(1)对卷云进行如下讨论。

2. 由卷云纹线的弯曲程度判别高空涡度

在(1)式中， V 总是正值，故 $\frac{V}{R_s}$ 代表的曲率涡度在卫星云图上表现为三种情况：

- (1) $R_s > 0$ ，卷云沿气流方向呈气旋性弯曲，曲率涡度 $\zeta_s > 0$ ，高空为正涡度，对应下沉运动区，卷云很少或消散为一片晴空区；
- (2) $R_s = \infty$ ，曲率涡度 $\zeta_R = 0$ ，卷云为直线走向，一般表现为狭长的卷云带；
- (3) $R_s < 0$ ，卷云沿气流方向呈反气旋弯曲，曲率涡度 $\zeta_R < 0$ ，高空为负涡度，一般对应上升运动区，云区稠密，形成一片盾状卷云区。

图1 a和1 b给出了 $R_s < 0$ 、 $R_s = \infty$ 时的概略图。

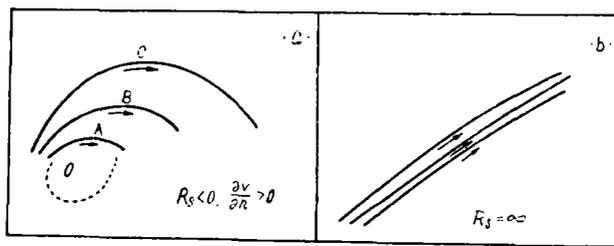


图 1 a

图 1 b

在图1 a中，A、B、C分别表示三条曲率半径不等的卷云线，其中线A的曲率半径最小，线C的曲率半径最大。由 $\frac{V}{R_s}$ 可知，若 V 不变时，线A代表的负涡度最大，线C代表的负涡度最小。由于卷云线曲率的不同，使卷云线沿气流方向呈散开的云型，曲率半

径最小的卷云线内侧常有一个负涡度中心，它可在卫星云图上确定出来。例如在图 2 a 中，三条白色卷云线 E—F、A—B 和 M—N 作反气旋弯曲，其中 E—F 的曲率最小，M—N 的曲率最大，高空负涡度中心位于 C 处。卷云线 A—B、M—N 沿气流方向散开，与高空图上槽前气流辐散相同。又如图 2 b 中，卷云线 A—B 呈直线，在卷云带中还出现横向波动云系，说明卷云带的曲率为无穷大，高空曲率涡度为 0。

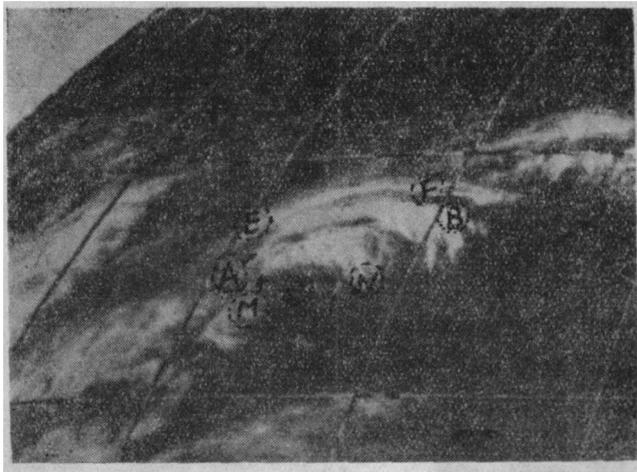


图 2 a 1979年3月28日05时 GMS (同步气象卫星) 红外云图

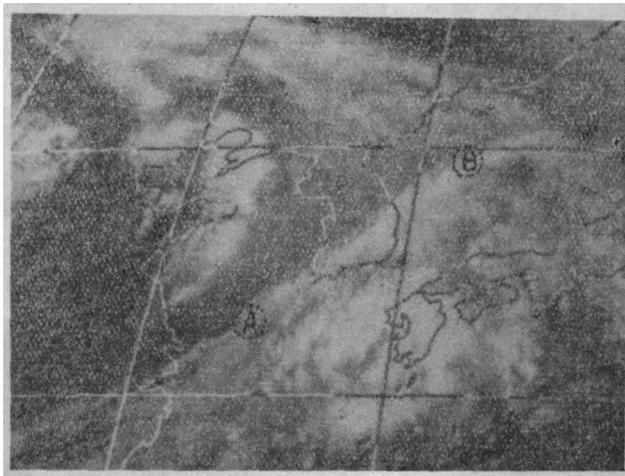


图 2 b 1979年5月15日17时 GMS 红外云图

3. 由卷云线边界的光滑程度判别高空涡度

在卫星云图上，我们常可见到反气旋弯曲的卷云线边界有时十分光滑，有时十分松散，这也反映了高空流场的特征，由 $\zeta_R = \frac{V}{R_c}$ 项可知，当 $R_c < 0$ 时，高空为负涡度，并且它与风速 V 成正比，风速愈大，负涡度愈大。因此，通常卷云线愈光滑就表示高空风愈大，高空负涡度也愈大。如图 3 a 中，A—B 为一片反气旋弯曲的十分光滑的卷云

线，与当天08时500 mb实测风比较，它对应的风速在20米/秒以上，高空风大，相应的负涡度也大。实况表明当这片云系东移，在我国长江中下游一带出现了强烈天气。又如图3 b中，A处云系也呈反气旋弯曲，但卷云较松散，与当天20时500 mb实测风比较，这片卷云对应的风速在14米/秒以下。而在B处附近卷云很光滑，对应风速在26米/秒左右，但卷云呈直线形。



图 3 a 1979年3月29日05时GMS红外云图，上标同日08时500毫巴实测风

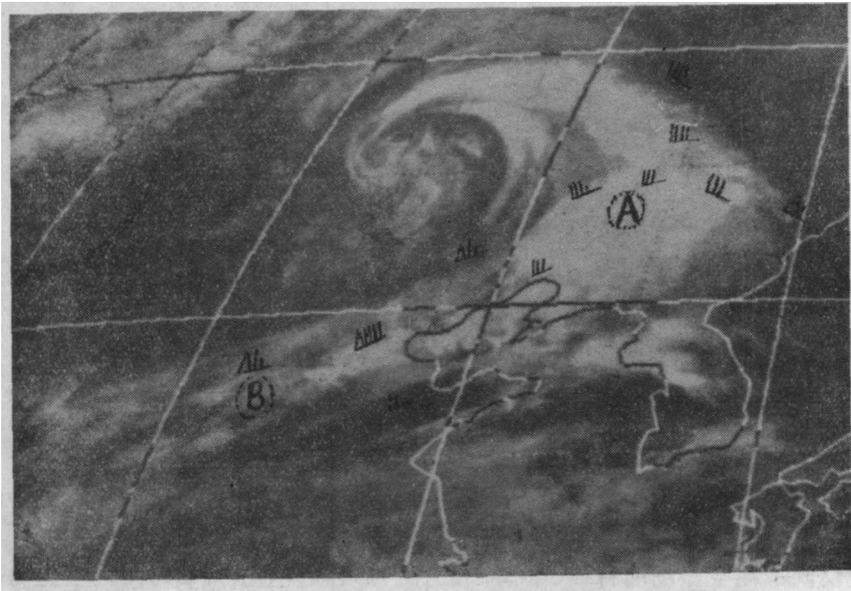


图 3 b 1979年3月13日17时GMS红外云图，上标该日20时500毫巴实测风

另外，在分析卫星云图时还要注意，当 ζ_R 一定时，曲率小的卷云线要比曲率大的卷云线更光滑些，这是因为当 V 增大时， R_s 也要增大，才能使 ζ_R 保持不变。

4. 由卷云线沿气流方向伸展的长度判别高空涡度

在卫星云图上，卷云线在气流方向伸展的长度各不相同，其长短主要决定于风速，风速愈大，构成卷云的冰晶飘移距离愈长。当形成卷云的机制充分时，卷云线的长短大体可表示风速的相对大小。由 $\zeta_n = -\frac{\partial V}{\partial n}$ 看出，当 $\frac{\partial V}{\partial n} > 0$ ，风速沿 n 方向增大时，

切变涡度 $\zeta_n < 0$ ，即高空为负涡度， $\frac{\partial V}{\partial n}$ 愈大，则负涡度愈大。因此，在中高纬度地区卷

云线愈往高纬一侧愈长。如图 1a 中卷云线 C 的长度比卷云线 B 长，比卷云线 A 更长。在图 2 a 上也显示

了这种情况。反之，若 $\frac{\partial V}{\partial n} < 0$ ，

则切变涡度 $\zeta_n > 0$ ，即高空为正涡度。例如图 4 a 中，卷云线呈反气旋弯曲，如定出最长的卷云线 A—B，则在 A—B 以北，卷云线愈往北愈短，在 A—B 以南，卷云线愈往南愈短，并且卷云线变短比 A—B 以北要快，这说明在 A—B 以南的负涡度比其以北的要大。因此在 A—B 以南的云系较稠密，最亮的

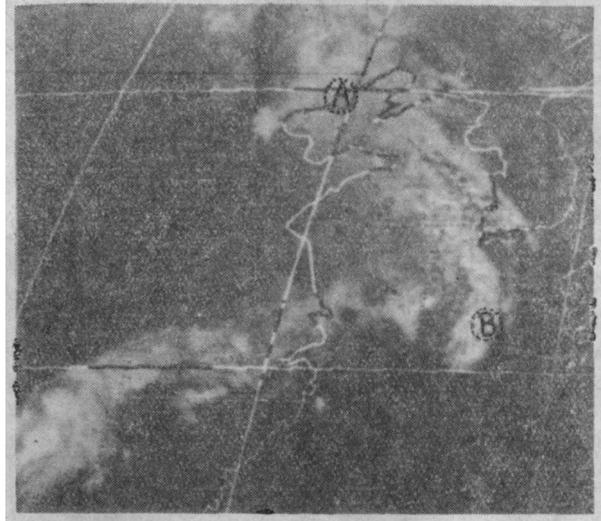


图 4 a 1979 年 7 月 11 日 17 时 GMS 红外云图

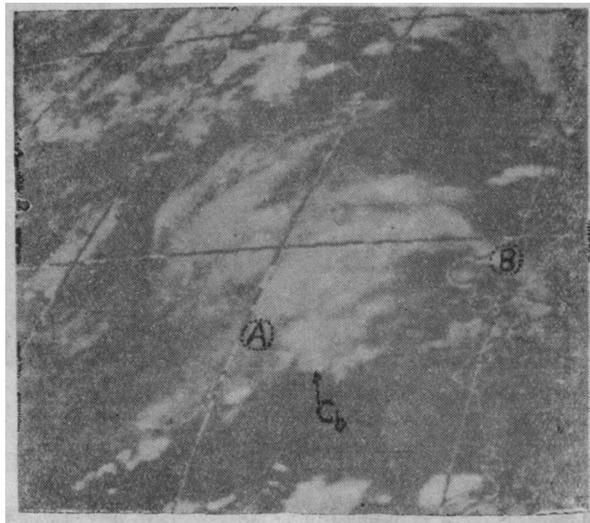


图 4 b 1979 年 6 月 2 日 05 时 GMS 红外云图

为积雨云系且与高空负涡度中心相一致。图 4 b 中 A—B 为锢囚锋云带，云带上的卷云线表现出愈往北愈短的特征。

与图 1 a 相应, 可以得出 $\frac{\partial V}{\partial n} < 0$ 时的概略模式如图 5 a, 若 $\frac{\partial V}{\partial n} < 0$ 和 $\frac{\partial V}{\partial n} > 0$ 同时出现在卫星云图上, 且考虑到曲率涡度的作用, 则可得出概略图 5 b.

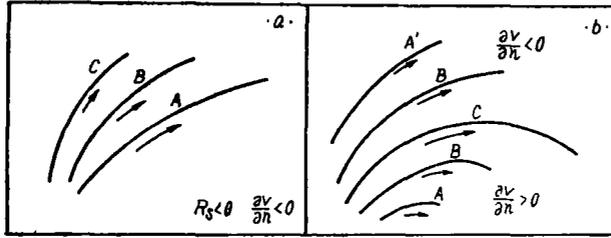


图 5 a

图 5 b

5. 由卷云在气流方向伸展的范围判别高空流场

在卫星云图上, 一般认为卷云区代表上升运动的范围。与天气资料对照分析表明, 在大范围上升运动区, 高空脊一般较浅, 卷云能顺气流延伸到脊线之前, 形成一片盾状卷云区。在这种情况下, 一般高空辐散较强, 云系较稠密, 天气区范围也广, 并常与低空发展着的气旋波联系在一起。如图 6 a 中, 云区 A 越过 500 mb 脊线表现为盾状, 云区范围也较广, 高空辐散明显, 实况表明未来云系发展为一个完整的气旋云系。

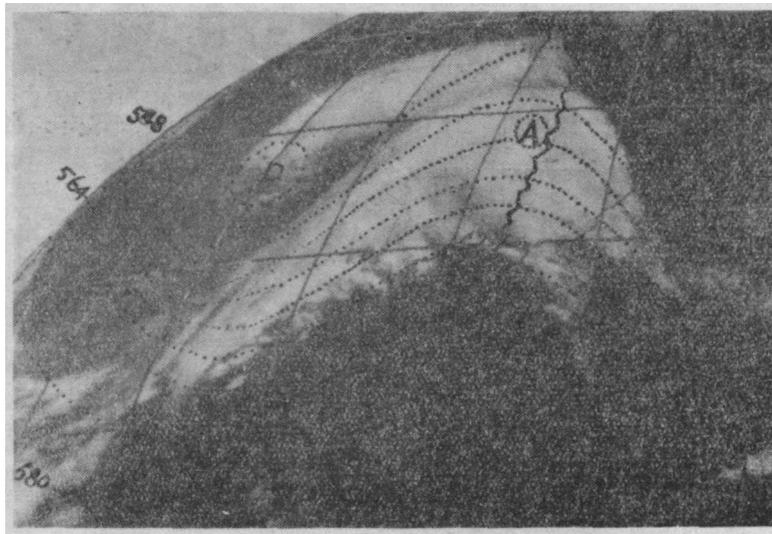


图 6 a 1979 年 4 月 12 日 05 时 GMS 红外云图

~~~~~ 4 月 12 日 08 时 500 毫巴脊线

..... 500 毫巴等高线

在高空脊较陡的情况下, 卷云不能越过脊线, 只分布于脊后, 脊前为强的下沉运动区。在这种情况下, 卷云东移减弱, 速度减慢。如图 6 b, 可以看到卷云系并不表现为完整的盾状, 它们向东北伸展到高空脊线处就中断, 与当日 20 时 500 mb 图对照, 该高空脊为暖性, 脊线位于云系前缘, 卷云受暖高影响易于下沉蒸发而消散。

## 6. 由卷云的南北幅度判别高空环流特征

将图 6 a、6 b 与图 2 a 比较, 卷云的南北幅度很不一样, 图 3 a 中卷云的南北幅度较小, 说明大气波的振幅较小, 气流以纬向为主, 云系移速较快, 据统计在中纬度约为 10—12 经度/天。在图 6 a、6 b 中, 卷云的南北幅度较大, 表明高空气流以径向为主, 有利于将低纬暖湿气流输送到较高纬度, 云系移动较慢, 一般在中纬度约 7—8 经度/天。

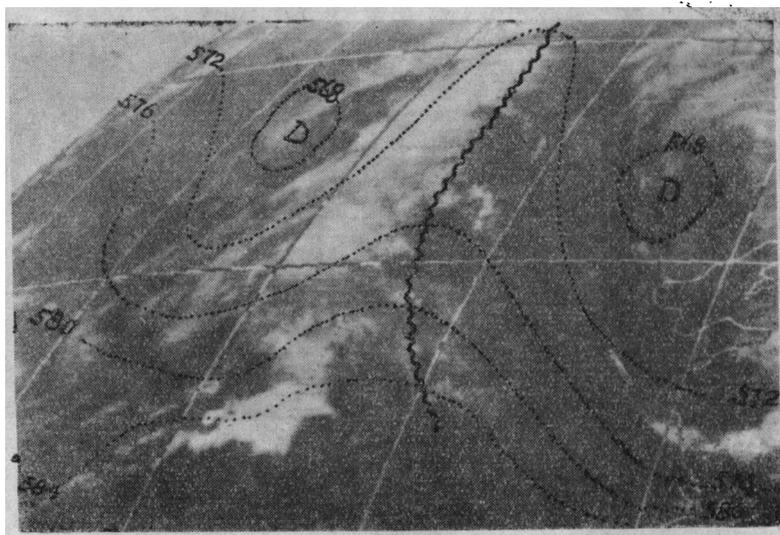


图 6b 1979 年 6 月 2 日 20 时 GMS 红外云图

## 7. 由卷云区云量稠密程度和卷云区的扩大估计高空散度

在卫星云图上, 卷云区中云量浓密程度相差很大, 云量浓密地区表示有丰富水汽的较强的上升运动, 那里的卷云如与中低云结合, 使云系厚度大大加大, 带来更大的降水。如果比较前后两个时刻的卫星云图, 当卷云区变得稠密且范围扩大, 则表示高空辐散。如  $A$  为时刻  $t_0$  的卷云面积,  $A + \Delta A$  为  $t_1$  时刻的卷云面积, 则按高空卷云估计的散度由

$$D = \frac{1}{A} \frac{\Delta A}{t_1 - t_0} \quad (2)$$

得出。

## 8. 高空槽前多个涡度中心(高空中系统)

在卫星云图上, 高空槽前有时会出现几个南北幅度小、呈反气旋弯曲的卷云区。可以把它们分别看成具有涡度中心的高空中系统。它们经常互相合并最后形成一个中心, 使云系明显加强连成一片。如图 7 a 中, A、B、C、D、E 为与高空槽前涡度中心相联的卷云区, 它们相互合并于次日形成一个完整的温带气旋云系(见图 7 b)。

## 9. 两种特殊的卷云辐散

(1) 当高空急流云系与积雨云相遇时, 积雨云顶部卷云常随高空气流伸展很长距离, 由于急流的抽吸作用, 使低层辐合加强, 积雨云强烈发展并产生强烈对流天气。但

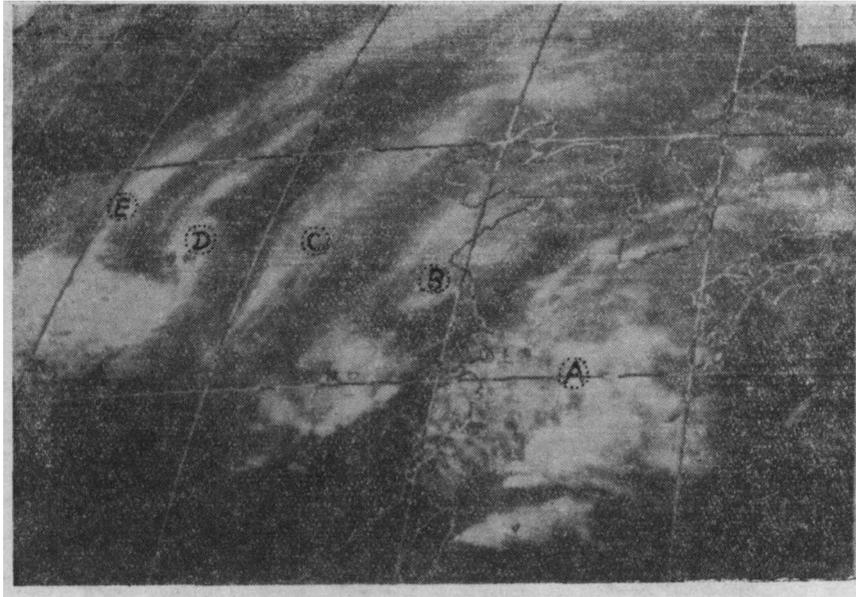


图 7 a 1979年1月28日17时GMS 红外云图

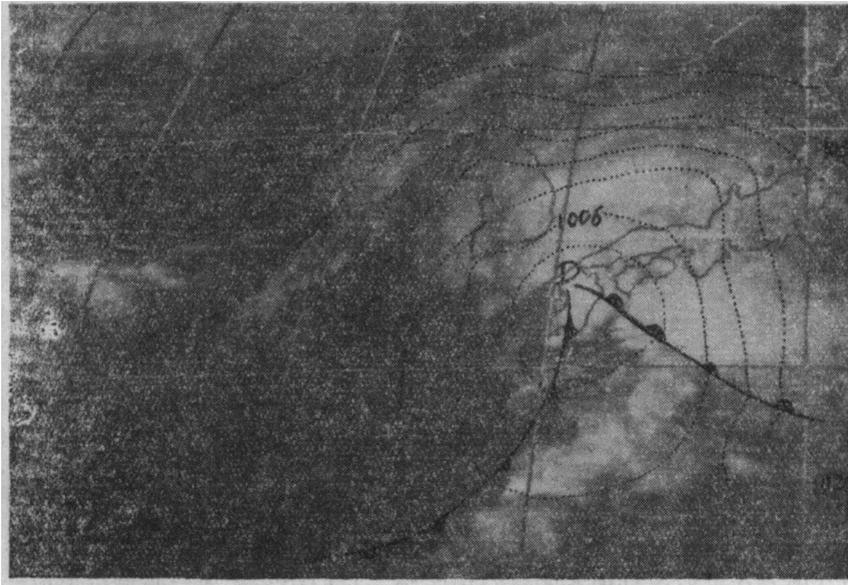


图 7 b 1979年1月29日17时GMS 红外云图  
 .....表示地面等压线，冷暖气为同日20时地面图上的位置

因高空风的垂直切变很大，这类系统生命史很短。如图 8，位于浙江北部的积雨云顶向东北方向伸展形成几千公里的卷云带，云带为直线型，在积雨云上风一侧边界很整齐，该积雨云在金华地区三个县下了强冰雹。

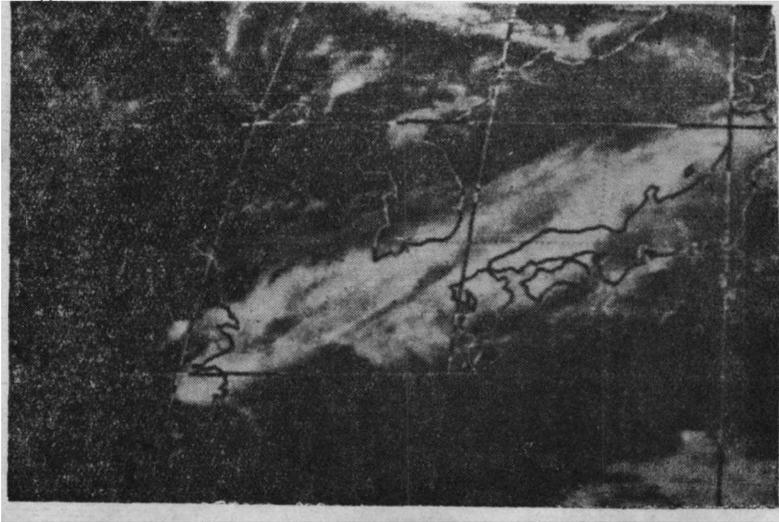


图8 1979年4月29日17时GMS红外云图

(2)梅雨锋云带上通常分布有积雨云团，在梅雨云带以北，高空为西风气流，而在云带以南为东风气流，这样在东西风带交界处构成了高空辐散。云带北侧的卷云向东北方向伸展，南侧的卷云向西南方向伸展。例如图9，在我国长江流域维持有一条东西向的梅雨云带，云带中有若干个明亮的积雨云团，积雨云顶的卷云向东北和西南方向散开。

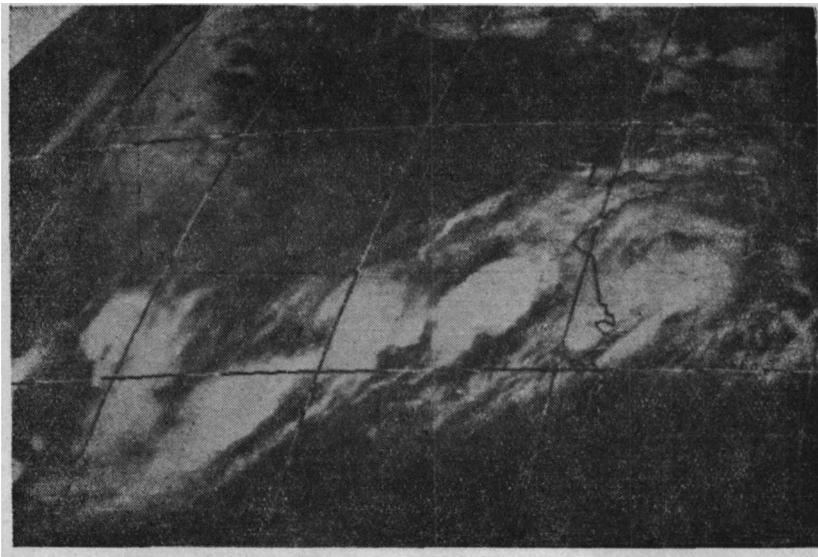


图9 1979年7月15日21时GMS红外云图

### 三、由卷云的变化判别高空流场的变化

从连续两个时刻的红外云图上卷云变化可以判断高空流场的变化。如将方程(1)对时间求导数，这时

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial V}{\partial n} \right) - \frac{V}{R_s^2} \frac{\partial R_s}{\partial t} + \frac{1}{R_s} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3)$$

式中第一项是切变涡度随时间的变化，第二项是曲率随时间的变化，第三项是加速度项。

### 1. 由卷云线长度的改变判断高空涡度的变化

只考虑第一项  $-\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial V}{\partial n} \right)$ ，如  $\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial V}{\partial n} \right) > 0$ ，则  $\frac{\partial \zeta}{\partial t} < 0$ ，在此条件下，后

一时刻红外云图上卷云线沿  $\vec{n}$  方向一侧伸展的长度愈来愈长（或愈向高纬一侧云线愈光滑）。如图10 a 中，在  $t_0$  时刻有三条卷云线 A、B、C，到  $t_1$  时刻卷云线 A 和 B 长度明显增长，卷云线 A 增长大于卷云线 B，这时在卷云线 A 的南侧的高空负涡度明显加大，表

示天气系统正在发生和发展。反之，如  $\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial V}{\partial n} \right) < 0$ ，则  $\frac{\partial \zeta}{\partial t} > 0$ ，表示高空正涡

度加大，不利于天气系统发展，卷云线的伸展情况与图10 a 相反。

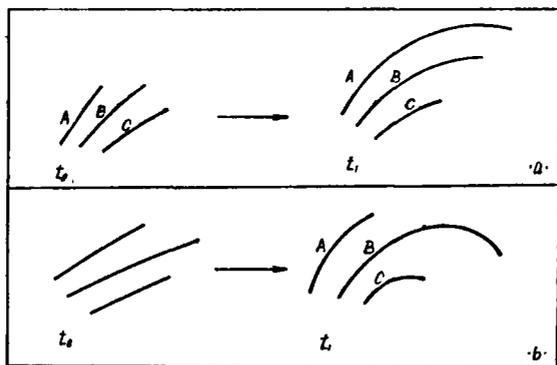


图 10

### 2. 由卷云线曲率的改变判断高空涡度的变化

仅考虑第二项  $-\frac{V}{R_s^2} \frac{\partial R_s}{\partial t}$ ，如  $R_s < 0$ ，且在风速一定的条件下，当  $\frac{\partial R_s}{\partial t} > 0$ （因

$R_s$  是负数，所以  $\frac{\partial R_s}{\partial t} > 0$ ，表示曲率半径长度缩短），则  $\frac{V}{R_s^2} \frac{\partial R_s}{\partial t} > 0$ ，即  $\frac{\partial \zeta}{\partial t} < 0$ 。

在前后连续的两个时刻的卫星云图上，反气旋弯曲的卷云线曲率半径愈来愈小，表示天

气系统发展，图10b为这种情况的概略云图。反之，当  $R_s < 0$ ， $\frac{\partial R_s}{\partial t} < 0$ ，则  $\frac{V}{R_s^2} \frac{\partial R_s}{\partial t} < 0$ ，

即  $-\frac{\partial \zeta}{\partial t} > 0$ , 高空涡度增加, 在卫星云图上卷云线的曲率半径愈来愈大。

### 3. 由卷云线的光滑程度的改变判断高空涡度的变化

仅考虑第三项  $\frac{1}{R} \frac{\partial V}{\partial t}$ , 若  $R_0 < 0$ ,  $\frac{\partial V}{\partial t} > 0$  时, 必有  $-\frac{\partial \zeta}{\partial t} < 0$ , 表示天气系统发

展。反映在卫星云图上, 呈反气旋弯曲的卷云线愈来愈光滑, 并且愈来愈长。相反, 若卷云线变得松散或不清楚, 表示天气系统减弱。

在实际分析卫星云图时, 要将上面三项作用同时考虑, 判断天气系统是发展还是减弱。如三项都有利于高空负涡度加大, 则天气系统强烈发展, 如只有一或二项有利高空负涡度加大, 则天气系统一般为中等程度发展。

## 四、由卷云判别天气系统的强弱及发展

从红外云图上的卷云来讨论天气系统的强弱及其发生与发展只限于高空而言, 实际上云系的加强与减弱还与下垫面及低空大气状况密切有关, 如下垫面的加热差异, 低层水汽条件, 低层辐合状况等, 这些将另文讨论, 这里仅就上述讨论, 根据云系特征提出预报天气系统强弱及其发生发展与移动快慢的一些指标, 现分述如下:

### 1. 天气系统强弱的判别

如果符合下述几条, 可认为是强天气系统。

(1) 卷云区(线)呈反气旋弯曲, 卷云线清楚, 边界光滑, 尤其当云系北界十分清楚时;

(2) 卷云区中卷云线沿气流方向散开, 愈往南其反气旋曲率半径愈小, 说明那里有个负涡度中心;

(3) 卷云区中反气旋弯曲的卷云线沿气流方向伸展的长度愈往高纬愈长;

(4) 卷云区与中低云区相重叠, 并且在反气旋弯曲卷云的下方有积雨云存在;

(5) 反气旋弯曲的卷云区范围较广, 云区中云量十分稠密。

如与上述情况相反, 则系统是弱的。

### 2. 天气系统发生发展的判别

如果前后连续两个时刻的红外云图上卷云区符合以下各条, 可认为天气系统将发生发展。

(1) 卷云区(线)的反气旋弯曲变得愈来愈明显;

(2) 卷云区北界或卷云线愈来愈清楚, 边界愈来愈光滑;

(3) 反气旋弯曲卷云区(线)沿气流方向伸展, 长度愈往高纬愈长;

(4) 卷云区范围愈来愈大, 云系愈来愈稠密, 且与中低云重合;

(5) 槽前多个与涡度中心相联的卷云区(高空中系统)合并为一个中心。

与上述情况相反时, 天气系统将减弱。

## 五、由卷云判别天气系统的移动

### 1. 天气系统移动快时, 卷云具有的特征

- (1) 卷云区(线)南北幅度较小, 边界清楚或光滑;
- (2) 反气旋弯曲的卷云可以越过高空脊线伸展到下游;
- (3) 卷云与中低云没有结合在一起。

### 2. 天气系统移动慢时, 卷云具有的特征

天气系统移动慢时卷云特征与上述相反。此外, 当卷云区与中低云结合, 云区扩大, 云量加密, 有积雨云出现也是系统移动慢的特征。

本文承王鹏飞教授在百忙中抽出时间审阅全稿, 并提出了许多宝贵意见, 文中一些云图照片由浙江省气象台卫星组提供, 在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 中国科学院大气物理研究所、中央气象局气象台、北京大学地球物理系编著, 卫星云图使用手册, 农业出版社, 1975。
- [2] 陶诗言等译, 卫星云图在天气和预报中的应用, 科学出版社, 1972。
- [3] 中央气象局, 全国卫星云图接收应用会议文集, 科学出版社, 1976。
- [4] J. R. 霍尔顿 (Holton), 动力气象引论, 南京空军气象学院译, 1976。