

# 用红外和水汽两个通道的卫星测值 指定云迹风的高度\*

许健民 张其松 方 翔

(国家卫星气象中心, 北京, 100081)

## 摘 要

提出了一种改进的用红外和水汽两个通道的测值指定云迹风高度的算法。利用红外水汽散点图和云迹风本身自动地将有低云的目标区、有半透明卷云的目标区、有密蔽高云的目标区分开。在有低云的目标区和有密蔽高云的目标区用红外一个通道指定云高。在有半透明卷云的目标区用红外和水汽两个通道指定云高。在用两个通道的测值指定云高时, 假定卷云高度以上不存在水汽, 以红外和水汽两个通道亮温相同这个方程与两个通道辐射测值线性相关的方程联立解出云的高度。

关键词: 云迹风, 云分析, 云高指定。

## 1 引 言

云迹风是目前数值预报中使用效果最明显的非常规资料。高度指定是云迹风推导工作中的一个难题。应国际卫星导风工作会议的要求, Nieman 等<sup>[1]</sup>对云迹风高度指定问题进行了评论。他们指出, 用一个窗区红外通道单独指定半透明卷云的高度有很大的误差, 增加一个吸收区通道则可以大大改进半透明卷云高度的指定。

用窗区通道和吸收区通道的辐射测值推算云量和云高的基本原理最早是由 Smith<sup>[2]</sup>提出的。后来 Chahine<sup>[3]</sup>和 McLeese 等<sup>[4]</sup>发展了这种算法。Szejwach<sup>[5]</sup>首先引入水汽波段作为吸收区, 将这种方法用于云迹风高度估计, 证实用两个通道比用一个窗区红外通道效果好。Menzel 等<sup>[6]</sup>用二氧化碳通道作为吸收区, 也改进了云迹风的高度估计。Szejwach 和 Menzel 的方法分别被欧洲<sup>[7]</sup>和美国<sup>[6]</sup>在业务工作中采用至今。日本气象厅<sup>[8]</sup>尚未发表用两个通道指定云高的算法<sup>[1]</sup>。

估计半透明卷云的高度需要知道大气中各个高度上存在密蔽云时的辐射测值作为已知条件。在 Szejwach<sup>[5]</sup>和 Schmetz 等<sup>[6]</sup>的算法中, 存在密蔽云时的辐射测值是用 ECMWF 的温度和湿度预报场进行辐射值的前向积分计算求出的。他们的算法就表达式而言是严格的。但是在实际工作中, 如文中第 4 节的典型资料分布所示, 洋面上资料极少, 资料稀少地区的温度、湿度预报场难以保证准确。这就导致了以此估算所得的卫星辐射测值不准确, 有时误差还相当大。当估算的和实际的卫星辐射值差别达到或超过 10% 时, 他们将估

\* 初稿时间: 1996 年 5 月 17 日; 修改稿时间: 1997 年 1 月 23 日。

算的卫星辐射值向实际的卫星辐射测值调整(进行垂直位移)<sup>[6]</sup>。显然,这是一种不得已的粗糙做法。

假定在卷云高度之上大气中不存在水汽,因而当在这个高度上存在密蔽云时,红外与水汽通道的亮温相等。这个关系式本身就可以用来代替大气中各个高度上存在密蔽云时的辐射测值这个条件解出云的高度。这个假定并不脱离实际,却避开了用数值预报场估计卫星辐射值这个不易做准的问题,取得了良好的实际效果。

在第 2 节将介绍改进的双通道云迹风估算方法,第 3 节用探空资料举例证实所提出算法的效果,第 4 节展示用两个通道指定云高所得风场的例子。

## 2 用水汽和红外两个通道的测值指定云高的算法

### 2.1 半透明卷云云高的确定

对于不透明的密蔽云,窗区红外通道的亮温可以用来代表它所在层次的环境温度。用来推导云迹风的示踪云目标中有相当多是半透明的卷云。半透明的卷云是在高层大气中随风飘的云。其外形随时间变化不大,是极好的追踪目标。但是由于其半透明性,即一部分辐射从云下穿过云透射而过。半透明的卷云在窗区红外通道上的亮度温度,比云所在层次的环境温度高。这就使得只用窗区红外一个通道指定卷云的高度有误差,它总是低估卷云的高度。Szejwach<sup>[5]</sup>指出,增加一个水汽通道的数据可以纠正这种误差。

图 1 是说明用窗区红外和水汽两个通道联合指定云高算法物理本质的示意图。图 1a 中标以  $WV$  的实曲线为水汽通道的权重函数,标以  $IR$  的虚曲线为红外通道的权重函数。如果没有云,水汽通道和红外通道的辐射主要来自权重函数所在的高度。图 1b 示意地表示有一层半透明的卷云存在。从卷云本身有辐射向上发射。由于卷云的半透明性,从云的下面向上的一部分背景辐射可以穿过卷云向上透射。其中红外通道的背景辐射来自云下的地面,水汽通道的背景辐射则主要来自云下水汽通道权重函数所在高度的大气。假定在

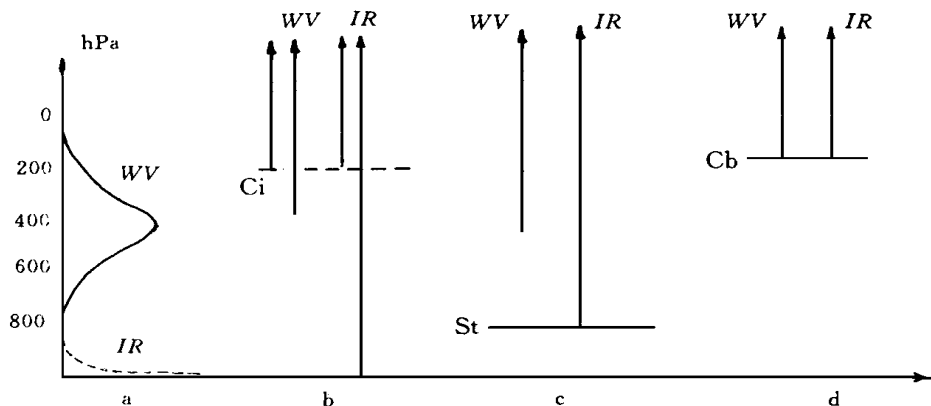


图 1 说明用窗区红外、水汽两个通道确定云高算法物理本质的示意图

卷云的高度以上,大气中水汽的含量已小到可以忽略不计。上述概念可以写成下述表达式:

$$R_{SAT,WV} = (1 - NE_{WV})R_{BKG,WV} + NE_{WV}R_{CLOUD,WV} \quad (1)$$

$$R_{SAT,IR} = (1 - NE_{IR})R_{BKG,IR} + NE_{IR}R_{CLOUD,IR} \quad (2)$$

在式(1)和式(2)中,字母  $R$  代表辐射,  $NE$  代表云的半透明度,它是云量  $N$  和云的透射率  $E$  的乘积。下标  $SAT$  表示卫星所接收的值,  $WV$  为水汽通道值,  $IR$  为红外通道值,  $BKG$  为从背景发射的值,  $CLOUD$  为从云发射的值。

设在两个通道处云的半透明度是相同的,即  $NE_{WV} = NE_{IR} = NE$ ,将式(1)和式(2)相除,并稍加改写,得:

$$\begin{aligned} & (R_{SAT,WV} - R_{BKG,WV}) / (R_{SAT,IR} - R_{BKG,IR}) \\ &= (R_{CLOUD,WV} - R_{BKG,WV}) / (R_{CLOUD,IR} - R_{BKG,IR}) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中,  $R_{CLOUD,WV}$  与  $R_{CLOUD,IR}$  分别是云在水汽、红外两个通道处的辐射值。它们是在云量为 1,而且云是密蔽、不透明情况下的辐射,近似等于云所在的环境温度下的黑体辐射。 $R_{BKG,WV}$  与  $R_{BKG,IR}$  分别是水汽、红外两个通道的背景辐射值。这 4 个物理量可以认为在示踪云目标区所在的 160km 见方范围内具有定值(常数)。其中的  $R_{CLOUD,IR}$  就是要求的云所在环境的红外亮温所代表的辐射。 $R_{SAT,WV}$  与  $R_{SAT,IR}$  是水汽、红外两个通道的卫星辐射测值。由于在示踪云目标所在的 160km 见方范围内存在卷云,并且其厚度不同,红外、水汽通道的辐射测值在示踪云目标窗区所在的范围内是有显著变化的。正因为红外通道的辐射测值随卷云的厚度有这种变化,用红外通道单独指定卷云的高度有很大的误差。式(3)表明,红外和水汽通道的卫星辐射测值之间有关系。把这种关系写成显式,就是式(4):

$$R_{SAT,WV} = aR_{SAT,IR} + b \quad (4)$$

$$a = (R_{CLOUD,WV} - R_{BKG,WV}) / (R_{CLOUD,IR} - R_{BKG,IR}) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} b = & (R_{CLOUD,IR}R_{BKG,WV} - R_{BKG,IR}R_{BKG,WV} - R_{CLOUD,WV}R_{BKG,IR} \\ & + R_{BKG,IR}R_{BKG,WV}) / (R_{CLOUD,IR} - R_{BKG,IR}) \end{aligned} \quad (6)$$

水汽和红外通道测值之间存在这种统计关系的观测事实及其物理原因是由 Szejwach<sup>[5]</sup>首先指出的。如上所述,式(4)中的系数  $a$  和  $b$  是常数,不是变量。在实际工作中,它们不必用式(5)和式(6)计算,而可以用红外和水汽两个通道的测值统计得出。式(4)中有两个变量。为了求云高,另外还需要一个关系式。Schemetz 等<sup>[6]</sup>所用的是各高度上存在密蔽云时卫星应该观测到的辐射测值。

设在卷云的高度以上水汽已经非常稀少,那么从卷云向上发射的辐射不再被大气削弱,卫星观测到密蔽、全云量云体在红外和水汽两个通道处的亮温值应该是一样的:

$$BT_{WV} = BT_{IR} \quad (7)$$

因此式(7)是密蔽的云应该满足的关系式。式(4)是红外和水汽通道测值之间本来就存在的关系式。

根据普朗克公式,亮温  $BT$  与辐射率  $R$  之间有如下关系

$$BT_{IR} = \frac{hc}{\lambda K \ln\left[\frac{2hc^2}{\lambda^5 R_{IR}} + 1\right]} \quad (8)$$

$$BT_{WV} = \frac{hc}{\lambda K \ln\left[\frac{2hc^2}{\lambda^5 R_{WV}} + 1\right]} \quad (9)$$

在式(8)和式(9)中,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速,  $K$  为玻尔兹曼常数,  $\lambda$  为波长。将式

(4)和式(7)联立,加上式(8)和式(9),就可以求出卷云所在高度上密蔽云的亮温。在图2上,式(4)和式(7)所代表的这两条直线的交点  $C$  就是密蔽的云所发射的辐射,相应的亮温可以代表环境的温度。如引言所述,我们引入式(7)与式(4)联立推算云高,避免了使用不准确的温度湿度场推算各高度上密蔽云的辐射值这个难题。

## 2.2 不透明中低云云高的确定

图 1c 是云在水汽通道权重函数高度之下时的情况,卫星水汽通道所接收到的辐射来自云上面的背景大气。由于到达卫星的水汽通道辐射没有与云发生任何相互作用,云没有为卫星水汽通道提供任何信息。不管权重函数所在的高度下面有没有云,水汽通道的观测值是一样的:

$$R_{SAT,WV} = R_{BKG,WV} = \text{常数} \quad (10)$$

表现在散点图图 2 中,卫星观测值在水平方向呈一字形散布。在这种情况下,只能依赖于红外通道一个通道来确定云高了。如果目标窗区内既有云又有地面,红外数据的散布范围可以非常宽,其低端的亮温代表云的温度;如果目标窗区内只有地面或只有一层云,红外数据散布范围很窄,地面的亮温较高,云的亮温较低。据此可以判断是否存在低云,并估计低云的高度。因为低云一般由水滴组成。水云一般来说是不透明的。这时候用红外一个通道来确定云的高度,误差就不大了。那么如何判断云的高度是否在权重函数的高度以下呢?可以直接用红外水汽散点图所示两通道测值统计关系回归线的斜率。当云位于水汽权重函数所在高度之上时,式(4)适用,且  $a > 0$ ,斜率为正值;当云位于水汽权重函数所在高度之下时,式(10)适用,斜率为 0。

## 2.3 密蔽、不透明高云云高的确定

当对流层上部有不透明的、密蔽的云存在时,水汽和红外两个通道的测值中都不包含来自云下大气背景的贡献,如图 1d 所示。这时候,两个通道的辐射测值分布在散点图图 2 上直线  $R_{SAT,WV} = aR_{SAT,IR} + b$  和直线  $BT_{WV} = BT_{IR}$  的交点  $C$  附近,所以可以直接用红外通道的亮温代表密蔽高云所在层次的环境温度。

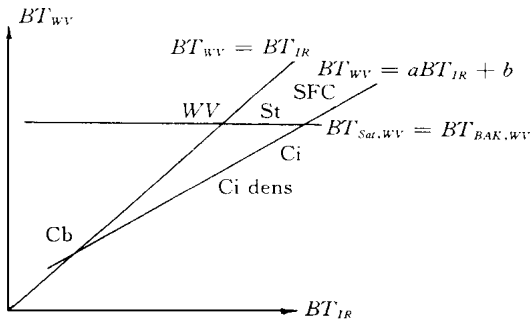


图 2 水汽、红外两个通道辐射测值的相互关系示意图

### 3 用水汽、红外两个通道的测值指定云高

图 3-6 给出两个通道的测值指定云高的例子。例子都取自 1996 年 3 月 8 日 00Z。它们代表用人机交互方式观察了几万个例子后归纳出的几种典型情况。在这些图中, a 图是探空站的温度露点曲线。从曲线可以看到测站上空湿层在什么高度上。湿层可以代表云所在的高度。b 图是以测站为中心的 GMS-5 红外图象。以图象内的红外、水汽数据做成散点图, 就是 c 图。

#### 3.1 无云区

图 3a 是海南岛三亚的探空曲线。这一天三亚晴空无云(图 3b), 在探空曲线上(图 3a), 对流层中有深厚的干层。这时在散点图(图 3c)上, 窗区内的红外、水汽亮温聚集成一团, 其水汽亮温  $BT_{SAT, WV}$  为 252K 左右。查探空曲线, 可看出水汽的背景辐射来自 430hPa

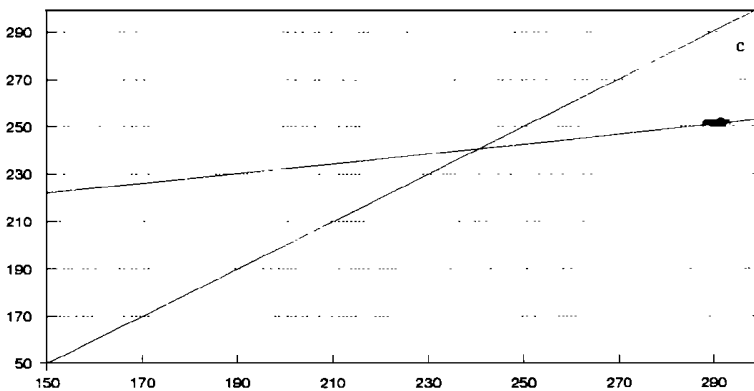
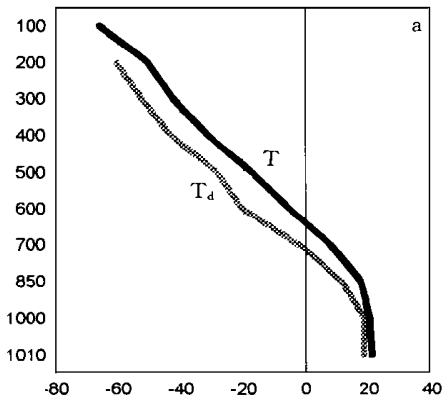


图 3 无云区的探空曲线(a)、示踪云(b)和散点图(c)

的大气。红外亮温则聚集在 290K 附近, 比当地的地面温度略低。

### 3.2 中低云

图 4 是 91245 站附近信风积云区的例子。从控空曲线(图 4a)上可看到, 850hPa 湿, 温度露点差小于  $1^{\circ}\text{C}$ ; 700hPa 干, 温度露点差达  $23^{\circ}\text{C}$ 。这说明云顶在 850hPa 与 700hPa 之间。在散点图(图 4b)上, 点子呈一字形排开, 说明示踪目标的范围内没有高云。低云的高度可由红外亮温的最低值估计, 其亮温最低值在 283K 左右, 正好在 850hPa 与 700hPa 之间。这与探空曲线上湿层的位置是一致的。这说明红外亮温可以用来估计低云的高度。

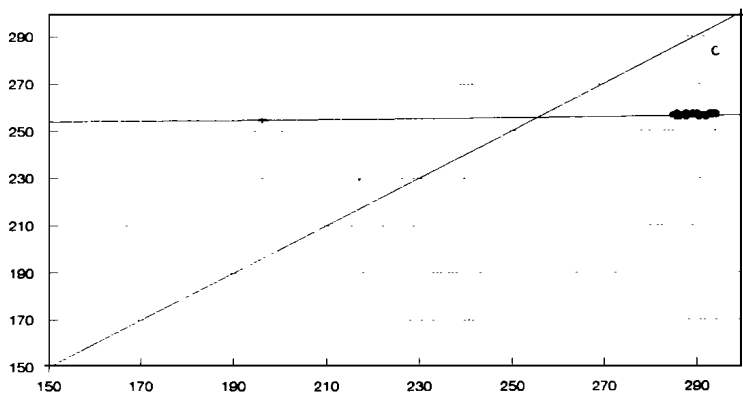
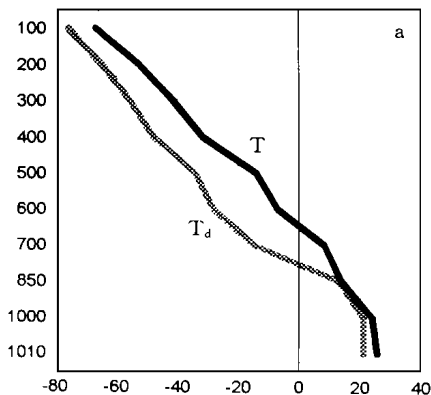


图 4 中低云区的探空曲线(a)、示踪云(b)和散点图(c)

### 3.3 卷云区

从图 5b 上可以看出, 在 91413 站周围有卷云。探空曲线图(图 5a)上表明, 在 200hPa

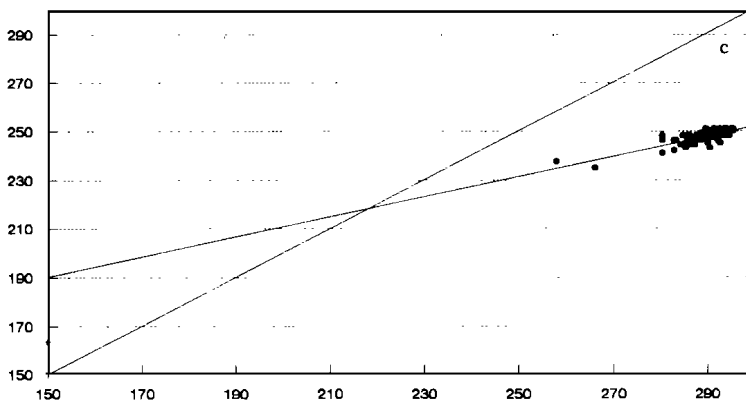
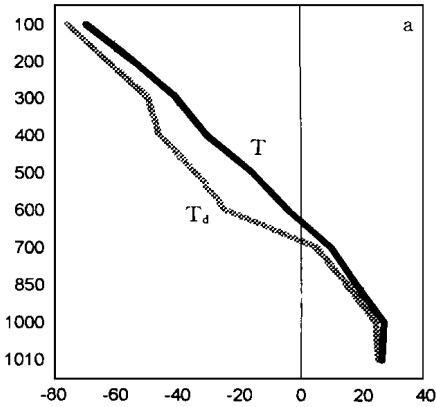


图5 薄卷云区的探空曲线(a)、示踪云(b)和散点图(c)

附近有湿层。从散点图(图5c)上看,图象窗的最低红外亮温在255K附近,相当于500hPa的温度。如果只用红外一个通道对云高进行估计,只能认为它在500hPa上下,而控空曲线(图5b)表明这里正好是干层。用订正后的亮温220K进行估计,则云高在200hPa上下,与探空曲线所示湿层高度一致。这个例子说明,文中所提出的算法有效地订正了卷云的高度。

### 3.4 密蔽、不透明的高云区

图6为中国湖北上空一块密实高云的例子。这一天的探空曲线(图6a)显示湿层向上伸到了300hPa。图象(图6b)上云相当密实。在散点图(图7c)上,点子组成的回归线与 $BT_{WR} = BT_{IR}$ 线相交,订正后的亮温与订正前无大差别。这个例子说明密实的高云只用一个红外通道也可以取得较准确的云高估计。这一天的红外最低亮温与双通道订正后的亮温都在220K左右,与探空曲线上300hPa的温度大体一致。

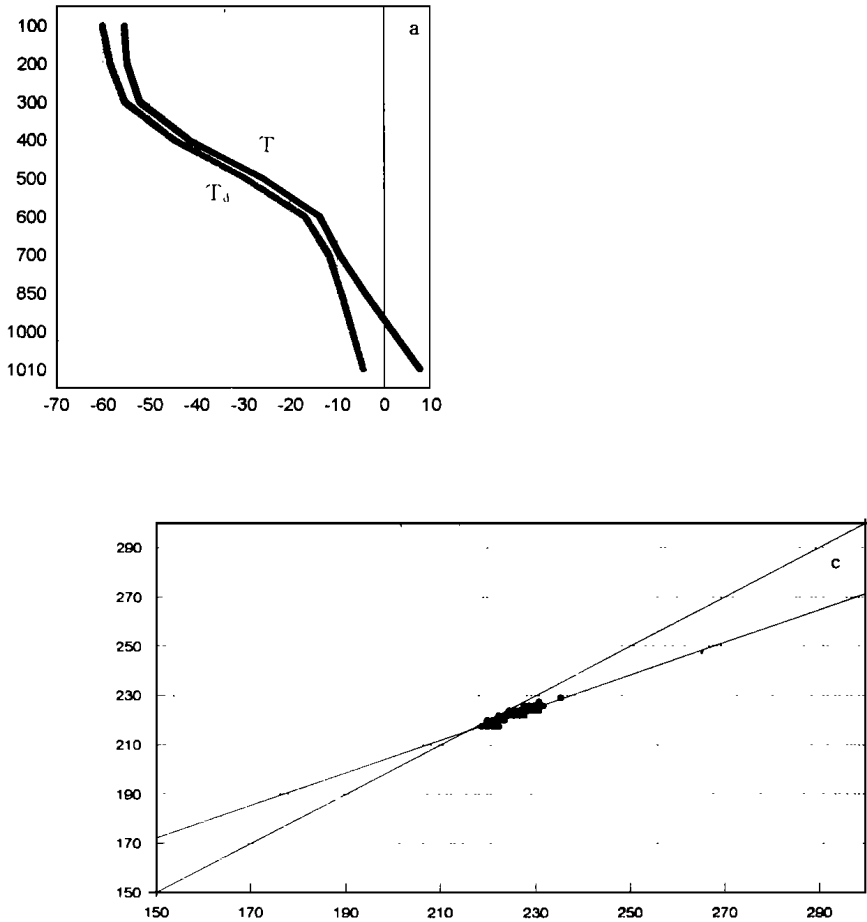


图 6 遮蔽、不透明云区的探空曲线(a)、示踪云(b)和散点图(c)

#### 4 云迹风与探空风的比较

作为所算出的云迹风及其高度指定具有真实性的证据,这里给出1996年3月6日05Z用GMS-5资料算出的云迹风图7a,1996年3月6日00Z北半球的探空风图7b,以及上面两张图的合成图图7c。图7的背景是1996年3月6日05Z的GMS-5全圆盘红外图像。图上红色、绿色、蓝色的矢羽分别代表对流层上部(200hPa)、中部(500hPa)和下部(850hPa)的风。注意,同一地点有3个矢羽的是探空风,同一地点只有一个矢羽的是云迹风。

首先看风的分布。云迹风在GMS星下点周围40个纬度的范围内2.5个经纬度网格点上取示踪云求出。图7a显示出云迹风的分布相当均匀。图7b表明探空资料在中国有很好的分布,而在日本至菲律宾以东的西北太平洋上,一共只有不到10个探空站。



接着比较图 7 中探空风与其周围云迹风的一致性。从图 7b 中任意挑一个探空站,在图 7c 中观察该测站周围的云迹风与相应层次上的探空风在风向和风速上的一致性。这种一致性提供了所算出的云迹风及其高度指定具有真实性的证据。

最后看云迹风所表示的天气系统。它们之中有: 澳大利亚东西两侧洋面上低层的东南风,即中国预报员常说的南半球冷空气; 南半球对流层上部的副热带高压脊, 其中有一个反气旋中心在昆士兰沿岸; 对流层上部大范围的越赤道气流; 北半球对流层上部的副热带高压脊; 中国南海上空低层的南风(与华南沿海的探空风相一致); 北太平洋上空大范围的东北信风; 北太平洋上中高纬度的气旋系统。云迹风生动地显示了这些系统的细节, 而探空风只是在个别地方有资料。这少数场地观测资料证实云迹风是对的, 却不能如云迹风那样把主要的天气系统勾划出来。这说明, 在数值天气分析和预报中使用云迹风是多么重要。

致谢: 樊昌尧解决了图象定位问题, 王景荣在常规资料方面做了许多工作, 张安东、戚丽娟提供了硬件支持, 蔡娟打印了所有的文稿, 在此一并致谢。

## 参考文献

- [ 1 ] Nieman S J, Schmetz J and Menzel W P. A comparison of several techniques to assign heights to cloud trackers. *J Appl Meteor*, 1993, 32: 1559– 1568.
- [ 2 ] Smith W L. An improved method for calculating tropospheric temperature and moisture from satellite radiometer measurements. *Mon Wea Rev*, 1968, 96: 387– 396.
- [ 3 ] Chahine M T. Remote sounding of cloudy atmospheres I. The single cloud layer. *J Atmos Sci*, 1974, 31: 231– 243.
- [ 4 ] McLeese D J and Wilson L S. Cloud top heights from temperature sounding instruments. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1976, 102: 781– 790.
- [ 5 ] Szejwach G. Determination of semi-transparent cirrus cloud temperature from Infrared radiances application to Meteosat. *J Appl Meteor*, 1982, 21: 384– 393.
- [ 6 ] Schmetz J, Holmlund K, Hoffman J and Strauss B. Operational cloud motion winds from Meteosat infrared images. *J Appl Meteor*, 1993, 32: 1206– 1225.
- [ 7 ] Menzel W P, Smith W L and Stewart T R. Improved cloud motion wind vector and altitude assignment using VAS. *J Climate Appl Meteor*, 1983, 22: 377– 384.
- [ 8 ] Meteorological Satellite Center. The GMS users guide, 1989. 37– 54.

# HEIGHT ASSIGNMENT OF CLOUD MOTION WINDS WITH INFRARED AND WATER VAPOUR CHANNELS

Xu Jianmin Zhang Qisong Fang Xiang

(National Satellite Meteorological Center, Beijing, 100081)

## Abstract

An improved cloud motion wind height assignment algorithm with infrared window channel and water vapour absorption channel was proposed. Our algorithm separates tracers with cirrus clouds from the ones with lower level clouds. For tracers with cirrus clouds, both infrared and water vapour channels were used in height assignment; while for tracers with lower level clouds, only infrared channel was used. In case of cirrus cloud tracers, it is assumed that there is no any water vapour above cirrus cloud level. With this assumption, the original clouds should be observed by the satellite with same brightness temperature at both infrared and water vapour channels. Combine the above relationship with the statistic relationship between infrared and water vapour measurements, height assignment of semi-transmissive cirrus cloud was made.

**Key words:** Cloud motion wind, Cloud analysis, Height assignment of cloud.