

二氧化碳切片法测定静止卫星的云风

斯 公 望

(杭州大学地理系)

二氧化碳切片法 (CO₂ slicing method) 是美国威斯康星大学空间科学和工程中心 (SSEC) 研究出来的一种最新的测定静止卫星云风的方法*。

静止卫星云图的云风测定是最新的测风方法之一, 它可以获得广大热带海洋地区无无线电测风观测区域的风的资料。

从云的移动来测定高空风是最古老的测风方法之一。在 1896—1897 年期间的国际云年已热衷于云飘浮的天气学观测, 并由此而得出月平均环流。但是随着无线电测风和探空的发展, 云风的观测已逐渐不用。

随着静止气象卫星的发展以及数值预报上为了改进初值的需要, 利用静止气象卫星得到的每半小时一张云图进行云风测定的工作得到重视和迅速发展。在第一次全球大气研究计划全球试验 (FGGE) 期间, 美国国家环境卫星局 (NESS) 测定了 GOES 静止业务气象卫星的云风; 美国威斯康星大学的 SSEC 测定了 GOES 静止业务气象卫星热带区域 (15°S—15°N) 的云风; 欧洲空间局 (ESA) 测定了 METEOSAT 的云风; 日本的气象卫星中心 (JMSC) 测定了 GMS 的云风。

云风的测定中有一系列的技术问题需要解决^[1]。首先是静止气象卫星照片的定位, 这是因为静止卫星的轨道与地球赤道平面有倾斜, 或卫星的旋转轴与地球的自转轴有倾斜, 或卫星运动轨道的椭圆性等引起的, 它使得拍到的照片范围发生变动, 从而要求确定照片的地理坐标。其次是从一系列照片上测定靶云的移动, 从而测定出云风。测定的方法可以由人的观测或用计算机找出时间不同的两张照片上某一小块区域的亮度资料或温度资料的相关来决定云的移动。第三是要确定测定云风的靶云的高度, 以决定所测到的云风是在哪个气压高度上。

从静止卫星云图的测风, 主要困难是难以判定它们是属于什么层次, 这就是说, 云高估计是云风

测定最大的误差源。目前云风的测定中使用的云高估计方法有以下几种。第一种是比较测风区域中红外窗区的亮度温度与测风区中的垂直温度廓线来定出云高^[2]。在云区中的红外窗区得到的亮度温度是云顶的黑体放射温度, 测风区的垂直温度廓线或用云区周围晴空区的垂直温度廓线来代替, 或用数值模式预报的垂直温度廓线, 然后找出云顶的亮度温度在垂直温度廓线上的位置估计出云顶的高度。这种方法假定云是不透明体, 而且云是布满卫星仪器的视场, 因而它对测定厚度大的层状云的云高使用效果较好。第二种方法称为双谱法^[3,4]。它是应用多重散射模式从云的可见光亮度计算云的光学厚度, 利用云的光学厚度计算出云的红外放射。此法是对云不布满卫星观测视场时改进的云顶高度的红外窗区估计方法, 但是对半透明的卷云的云高仍然估计不精确。第三种方法称为立体投影法^[5], 它是从两颗静止卫星同时扫描, 得到靶云的立体投影, 然后从几何关系估计云的高度。此法只能应用于两颗静止卫星观测有重叠的区域, 而且测量的时间也需相同。

在目前的云风测定中, 各家在确定云风的高度方法上存在着很大的差异^[6]。对于高层云风, 日本把用卷云测得的云风定为气候对流层顶高度上的风; 美国的 NESS 则是测定较厚的卷云的亮度温度, 然后应用国家气象中心 (NMC) 的全球分析来进行从温度到高度的换算; 美国威斯康星大学的 SSEC 也是利用测定卷云的温度, 然后用气候的垂直温度分布廓线定出云的高度; 欧洲空间局是应用对云顶的多谱高度确定法。对于低层的云风, 美国的 NESS 把低云测得的云风可以放在对流层下部任何一个高度层次上; 日本则是利用红外测定云顶的温度和高度; 由于低云风一般是与云底的风有关, 美国威斯康星大学的 SSEC 采用一个粗略的低云厚度估算, 然后从云顶的高度估算减去云的厚度, 得到估算的云底高度。

上述各种云风测定方法在不同高度的云层重叠的区域存在着确定云高的困难。二氧化碳 (CO₂) 切片法的优点是在测定靶云移速的同时确定出云高。方法的原理简述如下。在有多层云重叠的区域, 可以利用吸收率不同的几个 CO₂ 频道分离出高云、中云和低云。然后分别利用高云、中云和低云的云图测定高层云风、中层云风和低层云风。在决定云风的同时, 利用在三个 CO₂ 频道中有云存在和晴空条件下的辐射之差, 定量地确定云高。

目前, 美国的地球静止业务气象卫星上应用于探测大气温湿垂直廓线的仪器是可见红外旋转扫描辐射仪大气探测器 (VISSR Atmospheric Sounder), 简称为 VAS。这个仪器有 6 个温度探测器, 可探测 12 条光谱带中的红外辐射, 有 8 个光电倍增器探测可见光反照率。探测的红外光谱带的中心波长是在 3.9 与 15 μm 之间。VAS 的可见光照片分辨率是 1 公里, 红外照片的分辨率是 7 公里或 14 公里 (随使用的温度探测器而异)。

CO₂ 切片法是利用 CO₂ 在 15 μm 吸收区附近的三个频道的观测, 这三个频道的波长分别为 14.2 μm, 14.0 μm 和 13.3 μm, 它们的大气透射率和加权函数随气压的分布分别如图 1、图 2 所示。由图可

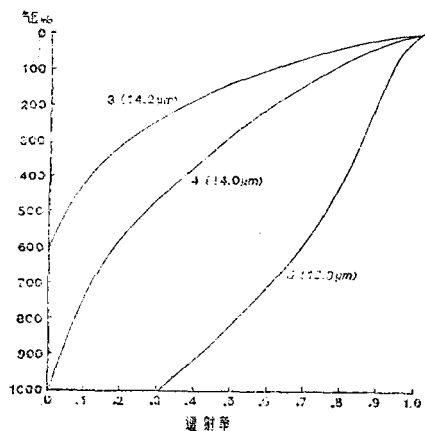


图 1 VAS CO₂ 频道 3 (14.2 μm)、4 (14.0 μm) 和 5 (13.3 μm) 的向空间放射的透射率随气压的变化

见, 对于卫星接收到的 14.2 μm (VAS 频道 3) 的辐射, 主要的来源是 350 mb 以上的大气层的放射, 因此只有高度大于 350 mb 以上的云放射的这种波长的辐射包含在该频道卫星测得的辐射之中。因此, 从频道 3 得到的云的图像是高云的照片。同样理由, 对于 14.0 μm (VAC 频道 4) 的辐射主要来源于

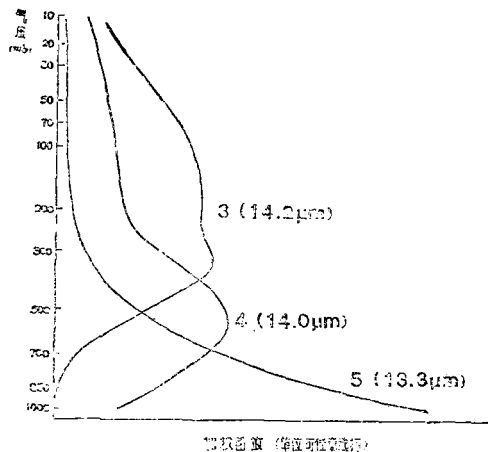


图 2 VAS CO₂ 频道 3、4 和 5 的加权函数曲线

600 mb 以上的大气层。因此, 由频道 4 得到的云图是高度大于 600 mb 以上的云的分布, 即包含有高云和中云。频道 4 照片的云层要比频道 3 照片的云层要宽。从频道 4 的云图中扣除频道 3 的高云部分, 就得到中云的云层图像。对 13.3 μm (VAS 频道 5) 的辐射主要来自 850 mb 以上的大气层, 因而它包含有高云、中云和低云的辐射, 故由这频道得到的云层又较频道 4 得到的要更宽。在该图上扣除频道 3 与频道 4 云图中的云层, 就得到低云的云层图像。分别追踪由这三个 CO₂ 频道得到的高云、中云和低云照片系列上靶云的移动, 可以测定大气中的高层、中层和低层的云风。这就是 CO₂ 切片法的实质。

至于如何确定云顶的气压, 以确定云风所在的气压高度。这是利用大气辐射传输方程来导出决定云顶气压的公式。在有云的卫星视场中 (图 3), 卫

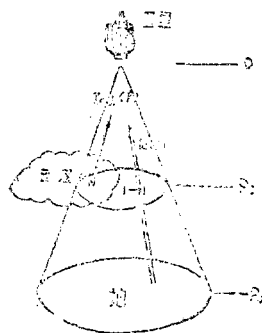


图 3 在有云的卫星视场中, 卫星测到的辐射来源示意图

星观测到波数为 γ 的辐射 $I(\gamma)$ 可表示为

$$I(\gamma) = NI_{cd}(\gamma) + (1-N)I_c(\gamma) \quad (1)$$

其中 $I_{cd}(\gamma)$ 为来自云区的波数 γ 的辐射; $I_c(\gamma)$ 为来自晴空区的波数 γ 的辐射; N 为视场中的云量, 当无云时为零, 云布满视场时为 1。

如图 4 所示, 来自云区的辐射 $I_{cd}(\gamma)$ 可表示成

$$I_{cd}(\gamma) = I_u(\gamma) + [\epsilon_{cd}(\gamma)B_{cd}(\gamma, T) + \tau_{cd}(\gamma)I_c(\gamma)]\tau_L(\gamma) \quad (2)$$

其中 $I_u(\gamma)$ 为来自云以上大气层的波数 γ 的辐射; $\epsilon_{cd}(\gamma)$ 为云的波数 γ 辐射的放射率; $B_{cd}(\gamma, T)$ 为云的波数 γ 的黑体放射; $\tau_{cd}(\gamma)$ 为云的波数

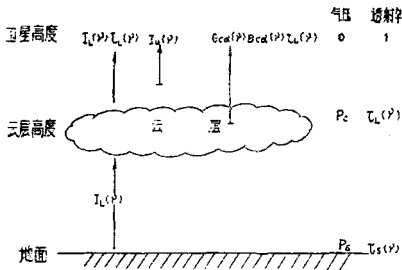


图 4 在云区中辐射来源示意图

γ 辐射的透射率; $I_c(\gamma)$ 为来自云层以下的波数 γ 的辐射; $\tau_L(\gamma)$ 为自大气顶至云顶之间大气层波数 γ 辐射的透射率。

假定云对红外辐射的反射率为零, 根据 Kirchhoff 定律有

$$\tau_{cd}(\gamma) = 1 - \epsilon_{cd}(\gamma) \quad (3)$$

代入 (2) 式, 可以得到

$$I_{cd}(\gamma) = \epsilon_{cd}(\gamma)I_b(\gamma) + [1 - \epsilon_{cd}(\gamma)]I_c(\gamma) \quad (4)$$

其中

$$I_b(\gamma) = \epsilon_{cd}(\gamma)I_u(\gamma) + \epsilon_{cd}(\gamma)B_{cd}(\gamma, T) \quad (5)$$

它表示来自云的放射和云以上大气的放射对卫星接收到的波数 γ 辐射的贡献。同时在表示式 (4) 中, 晴空条件下卫星接收到的辐射表示为

$$I_c(\gamma) = I_u(\gamma) + I_L(\gamma)\tau_L(\gamma) \quad (6)$$

把公式 (4) 代入公式 (1) 得到

$$I(\gamma) = \alpha I_b(\gamma) + (1-\alpha)I_c(\gamma) \quad (7)$$

其中 $\alpha = N\epsilon_{cd}(\gamma)$, 称为有效云量。

卫星接收到的与晴空条件下的波数 γ 辐射之差可表示为

$$I(\gamma) - I_c(\gamma) = \alpha[I_b(\gamma) - I_c(\gamma)] \quad (8)$$

根据大气辐射传输方程

$$I_b(\gamma) = B_{cd}(\gamma, T)\tau_L(\gamma) - \int_1^{\tau_L(\gamma)} B(\gamma, T)d\tau \quad (9)$$

$$I_c(\gamma) = B(\gamma, T_s)\tau_s(\gamma) - \int_1^{\tau_s(\gamma)} B(\gamma, T)d\tau \quad (10)$$

其中 $\tau_s(\gamma)$ 为从大气顶至地面整个大气层波数 γ 辐射的透射率; $B(\gamma, T_s)$ 为地球表面的波数 γ 辐射的黑体放射, T_s 为地球表面的温度。

$$I_b(\gamma) - I_c(\gamma) = B_{cd}(\gamma, T)\tau_L(\gamma) -$$

$$-B(\gamma, T_s)\tau_s(\gamma) - \int_1^{\tau_L(\gamma)} B(\gamma, T)d\tau$$

$$= \int_1^{\tau_L(\gamma)} d[B(\gamma, T)\tau(\gamma)] -$$

$$- \int_1^{\tau_L(\gamma)} B(\gamma, T)d\tau$$

$$= \int_1^{\tau_L(\gamma)} \tau(\gamma)dB(\gamma, T)$$

最后, 以气压作为自变量可以得到

$$I_b(\gamma) - I_c(\gamma) = \int_{P_c}^{P_0} P_c \tau(\gamma, P) \frac{\partial B[\gamma, T(P)]}{\partial P} dP \quad (11)$$

其中 P_0 为地面气压值; P_c 为云顶的气压值。

现使用在同一卫星视场中两个频道 γ_1 和 γ_2 的卫星辐射观测值以及相应两个频道的晴空辐射值, 可以得到下方方程

$$\frac{I(\gamma_1) - I_c(\gamma_1)}{I(\gamma_2) - I_c(\gamma_2)} = \frac{\epsilon_{cd}(\gamma_1) \int_{P_c}^{P_0} P_c \tau(\gamma_1, P) \frac{\partial B[\gamma_1, T(P)]}{\partial P} dP}{\epsilon_{cd}(\gamma_2) \int_{P_c}^{P_0} P_c \tau(\gamma_2, P) \frac{\partial B[\gamma_2, T(P)]}{\partial P} dP} \quad (12)$$

假若这两个频道的频率足够接近, 则可假定云在这两个频道的放射率近似相同, 即 $\epsilon_{cd}(\gamma_1) \approx \epsilon_{cd}(\gamma_2)$, 方程 (12) 即可用来确定卫星视场中云顶的气压, 其计算云顶气压的方法如下。

方程 (12) 左边 $I(\gamma_1)$ 、 $I(\gamma_2)$ 是卫星的观测值, $I_c(\gamma_1)$ 和 $I_c(\gamma_2)$ 是从 VAS 的晴空辐射观测值的空间分布求得。方程 (12) 的右边是根据垂直温度廓线计算各气压高度上的黑体放射 $B[\gamma, T(P)]$, 由此可以求得各气压高度上的 $\frac{\partial B[\gamma, T(P)]}{\partial P}$ 值, 各频道的透射率随气压分布 $\tau(\gamma, P)$ 是已知的, 故整个右边只有云顶气压 P_c 是一个未知量。Menzel 等应用国家气象中心预报的温、湿垂直廓线来计算各气压层上的 $B[\gamma, T(P)]$ 值。方程 (12) 右边的积

分是用每隔 50 mb 气压进行数值积分, 并从 1000 mb 开始, 每增加 50 mb 计算出一次积分值, 并从两个频道的积分值求得方程 (12) 右边的数值。这样从 1000 mb 到 100 mb, 每隔 50 mb 有一个方程右边的数值。从上述一系列的数值中, 把方程(12) 左边数值减去右边数值的绝对值为最小的该组气压的上界值取成云顶气压值。

云高确定以后, 即可从红外窗带的辐射观测按以下公式求得有效云量

$$N\epsilon_{ca}(\gamma) = \frac{I(W) - I_c(W)}{B[W, T(P_c)] - I_c(W)} \quad (13)$$

其中 W 为大气窗带的频率; $B[W, T(P_c)]$ 为假定云为不透明条件下的云的黑体放射。

应用三个 CO_2 吸收频道, 可以确定两个云顶气压 (14.2 $\mu\text{m}/14.0 \mu\text{m}$ 和 14.2 $\mu\text{m}/13.3 \mu\text{m}$)。

如果 $I(\gamma) - I_c(\gamma)$ 是在仪器的噪音影响以内 (约 1 $\text{mw}/\text{m}^2 \text{ster cm}^{-1}$), 则产生的 P_c 值将无用。在求得两个云顶气压中采用哪一个则由以下方法来确定

$$[I(\gamma_i) - I_c(\gamma_i) - N\epsilon_{ca}(\gamma_i)] \int_{P_s}^{P_{ck}} \tau(\gamma_i, P) dB(\gamma_i, T) = M_{ik} \quad (14)$$

$i=1, 2, 3$ (三个频道); $K=1, 2$ (两个云顶高度)。

当 $\sum_{c=1}^3 M_{ik}^2$ 为最小值的 P_{ck} 定为云顶气压值。

CO_2 切片法的试验结果是比较满意的。图 5 是用该法测定的 1982 年 4 月 8 日 1548 GMT、1648 GMT、1748 GMT 云图上的高、中和低三层云的风。图 6 为该日测定的中层云风与同日 12 GMT

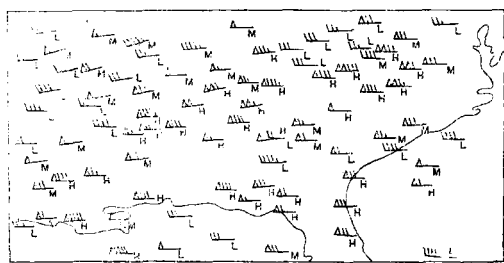


图 5 1982 年 4 月 8 日 1548 GMT、1648 GMT、1748 GMT 云图上高、中、低层云风 (H—高云风, M—中云风, L—低云风)

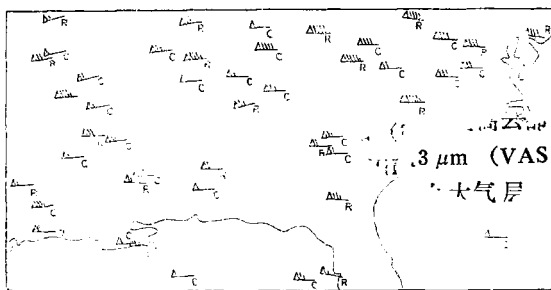


图 6 1982 年 4 月 8 日 1548 GMT 与 1748 GMT 时期的中层云风与 12 GMT 400 mb 的无线电测风比较 (C—中云的云风, R—400 mb 无线电测风)

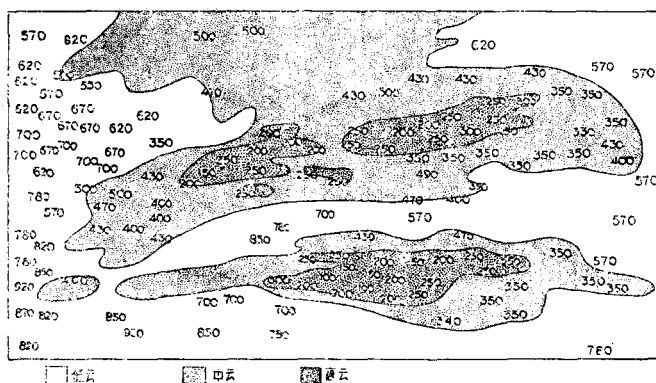


图 7 1982 年 4 月 8 日 1548 GMT 用 CO_2 切片法测定的云高

的 400 mb 无线电测风的比较。图 7 为用 CO_2 切片法确定的三层云的云高。

用 CO_2 切片法测定的云高与其它方法测定的

云高进行比较。它与立体投影法的结果非常一致。与无线电探空测得的云高也相当一致。双谱法测得的卷云高度要较 CO_2 切片法的偏低。(下转 51 页)

参 考 文 献

- [1] Mosher, F. R., Cloud drift winds from geostationary satellite, *Atmospheric Technology*, No. 10—winter 1978—79.
- [2] Friz, S. and J. S. Winston, Synoptic use of radiation measurements from satellite TIROS-II, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 90 (1962).
- [3] Mosher, F. R., Cloud height determination. COSPAR proceedings of the symposium on meteorological observations from space, their contribution to the First GARP Global Experiment (1976).
- [4] Reynolds, D. and T. Vonder Haar, A bi-spectral method for cloud parameter determination, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 105 (1977).
- [5] Hasler, A. F., Stereographic observations from geosynchronous satellites: an important new tool for the atmospheric sciences, *Bull. Amer. Met. Soc.*, Vol. 62 (1981).
- [6] Mosher, F. R., Intercomparison of FGGE Cloud tracked winds, In 'International conference on early results of FGGE and large-scale aspects of its monsoon experiments, Tallahassee, Florida, U. S. A. 12—17 Jan. 1981.
- * Menzel, W. P., W. L. Smith, and T. R. Stewart, Improved cloud motion wind vector and altitude assignment using VAS.