

根据 METEOSAT-1 卫星的水汽 通道资料推算水汽场

M. M. Poc

M. Roulleau

1. 引言

对大气在 $6.3\ \mu\text{m}$ 水汽吸收带的放射辐射进行遥感测量, 所得资料中含有全球水汽分布的信息。TIROS 卫星和雨云卫星上都有水汽通道, 其辐射探测资料已用于导出全球对流层上层的相对湿度 (Möller, 1961; Möller 和 Raschke, 1963, 1964; Raschke, 1966; Raschke 和 Bandeen, 1967; Fritz 和 Rao, 1967), 以及研究对流层动力学 (Steranka 等, 1973; Rodgers 等, 1976; Roulleau, 1978)。

METEOSAT-1 是第一颗有水汽 (WV) 通道的地球静止卫星, 通道光谱区间 ($5.65-7.45\ \mu\text{m}$) 的中心位于 $6.3\ \mu\text{m}$ 水汽吸收带。我们试图根据该卫星提供的图片推算出定量的水汽场。

迄今为止, 通常是利用卫星资料中 $6.3\ \mu\text{m}$ 水汽带和 $8-13\ \mu\text{m}$ 大气窗区的联合探测资料来导出相对湿度。Raschke (1966), Raschke 和 Bandeen (1967) 根据四种模式大气制作了对流层相对湿度的计算图。于是, 通过把两个红外通道同时取得的探测结果与计算图进行比较的方法, 用 TIROS-IV 的辐射仪资料得到几乎全球 500 mb 层以上的水汽质量分布图。通过这种比较, 有可能确定放射云层或放射地面以上的大气相对湿度。Fritz 和 Rao (1967) 对由“湿度图”推算的和由探空资料得到的 400—275 mb 层平均相对湿度做了比较, 结果表明, 根据湿度图推算出的湿度值比观测值低得多。

1980 年初, 欧洲空间局使用与上面所

述十分相似的方法来绘制对流层上层的相对湿度图。该方法也是立足于分析 METEOSAT 的辐射仪通道中两个谱区的红外辐射联合探测结果。与无线电探空仪相比, 这种方法产生的均方根差为 31.7%; 与气候温度廓线相比, 均方根差为 13.2% (Lunnon, 1980)。

鉴于上述方法误差过大, 我们研究了另一种不同的根据 METEOSAT 水汽图绘制相对湿度图的方法。我们探求水汽含量与水汽通道测量结果之间的直接关系。从无线电探空资料得到水汽含量, 再把它与水汽通道接收到的信号加以比较。为了获得定量的相对湿度图, 需要对 METEOSAT-1 水汽通道做精确的校准。本文中, 首先描述对 $6.3\ \mu\text{m}$ 通道进行校准的方法; 然后, 建立对流层平均相对湿度与数字磁带上计数之间的联系; 最后, 绘制出热带和中纬度地区上空对流层平均相对湿度图。

2. METEOSAT-1 水汽通道的校准

在开始进行这项研究时, $6.3\ \mu\text{m}$ 通道的校准曲线尚未确定, 所以那时先对可供利用的校准资料进行了检查。

卫星垂直俯视地球的视场是空间一个很大的区域, 若其温度已知, 该区域可作为一个校准点。根据欧洲空间业务中心 (ESOC) 的研究结果, 平均 2.5 的数字计数相当于气温约 2 K。另外, 卫星发射前测得的校准斜率是线性的, 并假定在飞行中这种线性关系仍然成立。在 Morgan (1979) 的校准报告中的表 2 和表 4 给出的斜率是 $6.5 \times 10^{-3}\ \text{Wm}^{-2}$

sr^{-1} 。也可以用月球进行校准：从月球扫描观测推导出的校准斜率是 $6.7 \times 10^{-3} \text{ Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ (Lunnon, 1980)。

Eyre(1980)采用的一种校准方法与我们的十分相似。水汽通道所“看到”的亮度温度是根据从飞机探测资料获得的大气廓线计算出来的,然后,找出它与 METEOSAT 的数字计数间的关系。用这种方法求得的斜率是 $7.3 \times 10^{-3} \text{ Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 。

我们在第一篇论文中(Poc 等, 1980)描述了获得 METEOSAT-1 水汽通道响应曲线的方法。我们建立了无云条件下卫星辐射仪测得的数字值与使用无线电探空资料、并借助于大气传输模式得到的辐射强度计算值之间的联系。这一初步研究依据的无线电探空仪数量有限,用了相当复杂的传输模式。研究结果与 ESOC 的结果并不一致,这一点很难解释。以后,又对气候变率更大的地区用更多的资料完成了这项研究。

我们研究中用到的是中纬度和热带地区无线电探空站的资料,地区范围局限于 1000 个点和 700 条线。它是交互式计算机系统可以同时显示的全球图象中的一部分。中纬度地区包括的范围是: $25^{\circ}\text{N} - 55^{\circ}\text{N}$, $30^{\circ}\text{W} - 20^{\circ}\text{E}$;我们研究了 1978 年 7 月 14 日、16 日及 1979 年 7 月 3 日、6 日、29 日的图象。热带地区的范围是: $0^{\circ} - 35^{\circ}\text{N}$, $35^{\circ}\text{W} - 15^{\circ}\text{E}$;对 1979 年 7 月 3 日、6 日、29 日的图象进行了研究。1979 年在上述纬度,有许多西非季风试验(WAMEX)期间获得的完整的探空资料可供利用。图 1 给出中纬度 1978 年 7 月 16 日的图象实例。对 METEOSAT 三个通道的数字数据磁带进行处理后便得到了这些图象。

对所选个例都根据 $10.5 - 12.5 \mu\text{m}$ 的图象和无线电探空资料进行了检查,以保证为晴空状况。温度廓线中,仅保留 100 mb 高度以下的无线电探空结果;水汽廓线中,保留 300 mb 高度以下的探测结果。更高层的大气资料是根据 McClatchey (1972)的中纬



图 1 METEOSAT-1 1978 年 7 月 16 日 1200 GMT 的图象 a. 可见光通道 b. 大气窗通道 c. 水汽通道

度夏季与热带模式大气及 Mastenbrook 的平流层水汽资料得到的。在研究各图象时,用到了 63 个无线电探空站。在图象上对各

站进行了精确定位,并从数字磁带上读取每个站点的计数值。定位方法确定一个站在图象上的位置,其精度估计小于4个像素,在中纬度地区,它相当于约 $32 \times 32 \text{ km}$ 。当然,与图象上 32 km 漂移相应的计数变化依赖于景物的对比度,但即便在对比度很强的地区,计数的变化也从未超过12。

METEOSAT-1水汽通道的频带很宽($1342-1774 \text{ cm}^{-1}$),需要用大量数据点才能做出精确的校准。为此,我们用了一种比STRANSAC模式(Scott, 1974; Chedin等, 1978)近似性更好的模式来判释这些图象。先用LOWTRAN-3模式(Selby和McClatchey, 1975; Selby等, 1976)进行了一次试验,对比结果表明,按LOWTRAN模式计算出的辐射强度比按STRANSAC模式得到的值要低10%。尔后,又把Moskalenko的经验模式(MSK)用于传输计算(Golubitsky和Moskalenko, 1966; Moskalenko, 1969)。对于METEOSAT的水汽通道谱区,该模式仅考虑 H_2O 的吸收。在IBM 370/168计算机上用STRANSAC模式计算一个辐射强度的时间为每 1 cm^{-1} 0.7 s,用Moskalenko模式为每 1 cm^{-1} 4 ms。

把晴空大气分为20层来计算到达卫星探测器的辐射强度,即

$$I = \Delta\omega \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^{20} g_{\Delta\omega} B_{\Delta\omega}(T_i) (\tau_{i+1} - \tau_i)_{\Delta\omega} \right)$$

其中, $\Delta\omega$ 是与计算步长相当的谱段,它必须与传输计算步长协调一致; n 是谱段数; $B_{\Delta\omega}(T_i)$ 是每一 $\Delta\omega$ 谱段普朗克辐射强度的平均值,它是第 i 层温度 T_i 的函数; τ_i 是从大气顶到第 i 层的整个气层的透射率。 $g_{\Delta\omega}$ 是与各谱段 $\Delta\omega$ 对应的仪器函数的平均值。我们已知METEOSAT-1水汽通道的仪器函数,但伴有总误差约10%,这一误差导致测量结果的不可靠性,这种不可靠性无法用有效试验的平均值来说明。

把从Moskalenko模式得到的辐射强度

值与从STRANSAC模式得到的辐射强度值加以比较,结果表明前者仅比后者低4%。考虑到大气资料的不可靠性和仪器函数有10%的误差,出现这样的差别是完全允许的。

依据探空资料绘制大气廓线是产生误差的主要原因。我们已算出相对湿度廓线 $\pm 5\%$ 的固定绝对误差对辐射强度的影响。计算用的是STRANSAC传输模式,得出的辐射强度相对误差为5%。沿温度廓线 $\pm 1 \text{ K}$ 的固定绝对误差,也会引起辐射强度的相对误差,为3%。

根据水汽通道图得到的辐射测量值,其误差的近似估算可以归结为:

$$\text{计数: } \Delta C = \pm 6$$

$$\text{辐射强度: } \frac{\Delta I}{I} = \pm 8\%$$

图2所示是METEOSAT-1水汽通道的校准曲线。曲线是对63个探空仪资料用Moskalenko模式计算得到的。对图象的空间景物研究后得出:计数2对应着零辐射强度。通过原点的回归线的斜率是 $6.8 \times 10^{-3} \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$,其均方差为 $7 \times 10^{-4} \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 。由此可见,用作METEOSAT-1水汽通道校准的几个不同的斜率值是相当一致的。

Beriot等(1980)研究出另一种方法。他们用TIROS-N卫星上经过校准的2型高分辨率红外辐射探测器(HIRS/2)通道12的测量结果对METEOSAT-1的水汽通道进行校准。由此得到的斜率为 $7.2 \times 10^{-3} \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 。为便于同我们的方法进行比较,图3给出了Beriot等从TIROS-N资料得出的校准曲线和我们的校准结果(黑点)。由于Beriot等在计算传输函数时用的是STRANSAC逐个谱线(line-by-line)的模式,图3中的比较也是用该模式计算辐射强度的。我们的点子沿校准线分布的离差同Beriot等的相同,均方根差都是 $7 \times 10^{-4} \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 。这样看来,与那种业务用垂直探测器各通道的权重函数的类似方法相比,我们的方法是同

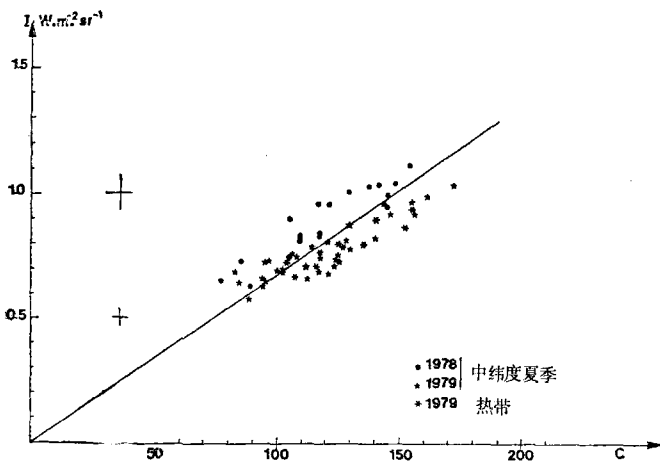


图 2 METEOSAT-1 水汽通道不同的校准线
(图中 C 为计数值, I 为辐射强度)

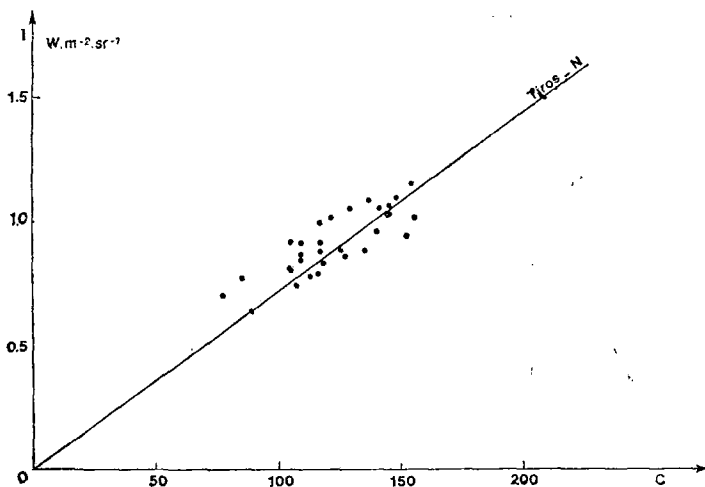


图 3 校准方法的比较。辐射强度值用 STRAN-SAC 传输模式计算(图中 I, C 的说明同图2)

样可靠的。根据校准曲线斜率几种不同的结果,可以认为 $7 \times 10^{-3} \text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 是一个可靠的数值。

3. 平均相对湿度的计算

我们从无线电探空仪的测量结果计算出水汽含量,并找出它与根据 Moskalenko 模式计算出的辐射强度值之间的联系。水汽通道探测到的是某一高度以上大气层的放射辐射。为了确定这一高度及与所测定的水汽量对应的气层厚度,我们对各探空站绘制了贡献函数,在研究前述图象时,用到了这些站的

资料。图 4 所示是三个中纬度站的贡献函数;罗马,那里的湿度和温度廓线接近于气候平均值;突尼斯,那里较为干燥和温暖;贝尔法斯特,气候较冷和潮湿。图 4 表明,在 600 mb 气压高度,辐射强度的贡献大约是其最大值的一半,故选取这一高度作为与被测定的水汽量值相应的气层的下边界。由于中纬度地区的无线电探空资料可以给出直到 300 mb 高度的湿度廓线,所以取 300 mb 为气层的上边界。

为了计算水汽含量,选择适当的湿度参数是必要的。在初步研究中(Poc 等, 1980),我们从两幅中纬度图象发现了 600 mb 高度以上辐射强度与可降水汽之间的相关性。但是,图象所对应的是稳定气象条件;对不同的天气状况进行类似的计算表明,无论在中纬度还是热带地区,这种相关性都不显著。如果注意到可降水汽是假定湿空气为理想气体,

根据露点廓线(即气压和露点资料)计算得出的,上述结论就不难解释了。辐射强度依赖于温度和湿度两个参数。相对湿度随温度和露点廓线的变化而变,所以是与辐射强度有相关性质的更为合适的参数。于是,定义平均相对湿度为气层相对湿度的算术平均值。在选定的中纬度和热带两个地区,根据所研究的 1978 年和 1979 年几幅图象中用到的所有探空站资料计算出平均相对湿度。图 5 标绘出中纬度地区夏季条件下对各探空站计算得到的结果,给出平均相对湿度 $\bar{U}$ 随水汽通道测得的辐射强度 I 变化的曲线。为求出

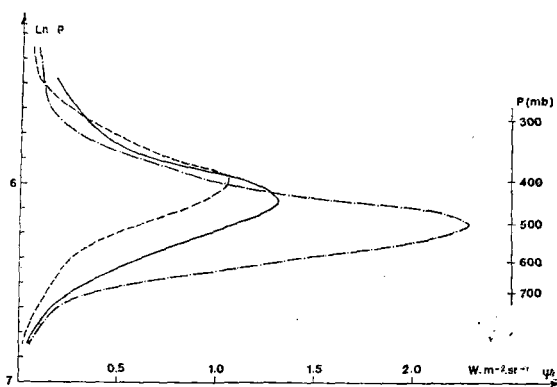


图 4 中纬度夏季条件下, 三个站的贡献函数。数值是用 Moskalenko 传输模式计算的。图中, 虚线——贝尔法斯特, 1978.7.14; 实线——罗马, 1978.7.16; 点划线——突尼斯, 1978.7.16

$\bar{U}$ 和 I 间关系曲线, 最小二乘法拟合的结果为:

$$\bar{U} = 14.6 I^{-2.5} (\bar{U} \text{ 的单位: } \%, I \text{ 的单位: } W m^{-2} sr^{-1})$$

热带地区有类似的测量结果, 最小二乘法曲线为:

$$\bar{U} = 18.3 I^{-3.4}$$

可惜, 热带地区的探空资料数比较少。看来, 平均相对湿度的变化相同时, 热带地区辐射强度的变化要比中纬度地区夏季辐射强度的变化小。

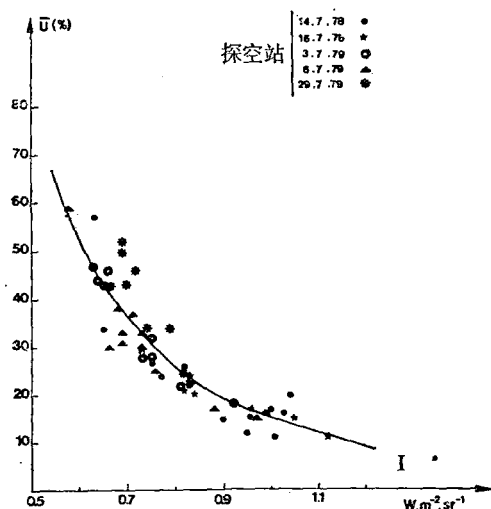


图 5 中纬度夏季条件下, 辐射强度随 600—300 mb 大气层中平均相对湿度的变化

4. 水汽场

第 3 节中的关系式可以用来分析无云时

对流层中层的水汽场。只要没有云形成, 就可以在计数的等值线与平均相对湿度的等值线间建立联系。于是, 根据存贮在磁带上的计数就可以直接用计算机绘出湿度场的定量图形。具体步骤可以归纳如下:

1) 交互计算机系统上显影得出的部分图象是由 1024 个点和 700 条线组成的。资料点的这一数目用于直接制作水汽图是太多了。以固定的线间距和点间距 (每 14 条线和 9 个点) 从数字磁带上选择读取计数值, 经重新计算, 得到一幅经过变换的图象。

2) 然后, 为表示计数值与辐射强度间关系的校准和求出表示辐射强度与平均相对湿度间的关系, 把每一计数值换成相应的相对湿度值。这样就得到由每一点上相对湿度值构成的数值图。

3) 根据数值图来表示水汽场的最好方法是绘制出相对湿度等值线。这要用到我们实验室所不具备的复杂的计算机程序。我们采用了一种较为简便的方法, 用不同深浅的阴影线表示相对湿度不同的范围, 用白色区把相对湿度不同的范围分隔开来。图 6 给出一例。在数值图上, 加进了陆地的轮廓线。若已知一点的经纬度, 很容易通过计算机对其进行定位。图中, 黑色区域表示相对湿度大于 70% 的有云区。这种黑区的形成是由于晴空条件下用无线电探空仪得到的平均相对湿度总是低于 70%。但是, 白色区由于可能有多重含义, 它所表示的内容往往含混不清。

尽管如此, 从全球图象的局部得到的这些数值图还是可以用来跟踪空间和时间变率。某一点相对湿度的变化, 或是由气团的动力运动所致, 或是由气团内部热力学过程所致。依据温度和平均相对湿度, 能够确定某一高度以上的可降水汽, 甚至能确定其通量。

5. 结 论

通过计算国际探空站网中一些特定站点

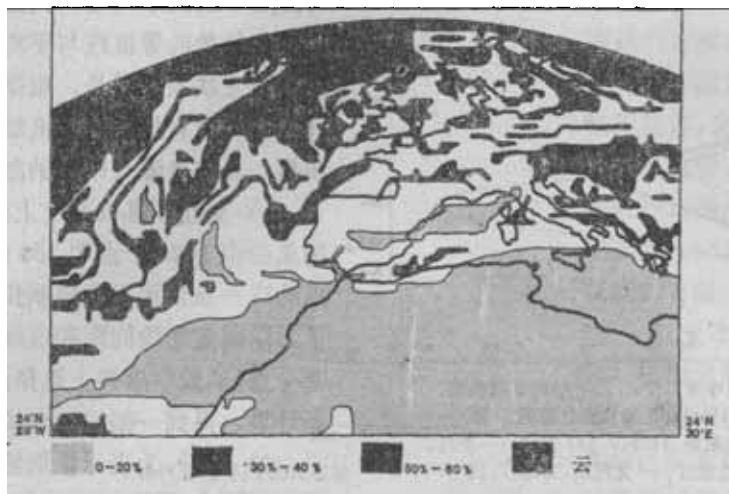


图 6 中纬度夏季条件下, 从METEOSAT-1水汽通道数字资料得到的1979年7月3日的平均相对湿度场

的辐射强度, 并利用磁带上的计数, 我们已能够对水汽通道进行校准。水汽通道响应的线性关系具有 $7 \times 10^{-3} \text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 的斜率, 这与其他研究者得到的结论极为一致。

为绘制水汽场图, 建立了辐射强度与对流层平均相对湿度间的经验关系。使用了一种准业务方法来根据所研究的图象确定相对湿度值不同的区域。所得结果在中纬度夏季和热带条件下是正确的。对于不同的气团, 该方法还须在其它地区和其它月份加以检验。

平均相对湿度和与之对应的正确高度间的关系还是个难题。根据试验得到的贡献函数表明, 对辐射强度贡献最大的气层, 在热带和中纬度夏季两种条件下位于不同的高度。在初步研究中(Poc 等, 1980), 我们对此做了探讨。深入的工作已在进行, 将在下一篇论文中发表。

孙阳译自 *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 22 No. 9 1983

宁斯校