

关于大气湿度垂直分布的红外遥测

李崇银 张道民 曾庆存

提 要

本文讨论了在气象卫星上用红外方法遥测大气湿度垂直分布的几个基本问题。分析了红外测温 and 红外测湿的原则区别,指出遥测湿度垂直分布应根据其特殊性按“最佳信息层”概念选择遥测通道,国外笼统地把测温的一套办法搬到测湿中并不合理。根据湿度遥测的“最佳信息层”概念,分析了红外测湿的重要局限。

大气中的水汽含量(湿度)是一个基本的气象要素。不论在日常的业务天气预报中,还是在其他气象保证方面,都需要知道大气的湿度分布状况。因此,湿度的测量一直是重要的气象观测项目。气象卫星出现之后,与用卫星遥测大气温度垂直分布一起提出了红外遥测湿度的问题,即用卫星测量地球和大气的红外射出辐射能量而间接推算湿度分布。当卫星轨道的倾角足够大时,采用这种方法可以获得全球范围的湿度资料。

国外用气象卫星已作过红外测湿的试验,根据这些试验结果可以认为,用红外法在气象卫星上遥测大气的湿度垂直分布大体是可能的。但是应该指出,红外法遥测大气的湿度垂直分布尚有不少基本问题有待解决。

国外的卫星红外光谱仪(SIRS-B)选取了六个测湿度垂直分布的遥测通道,它们都位于水汽吸收光谱的转动带,其通道中心位置(波数)分别为 531.5cm^{-1} , 436.5cm^{-1} , 425.5cm^{-1} , 291.5cm^{-1} , 302.0cm^{-1} 和 280cm^{-1} 。史密斯^[1]给出的这些通道的所谓“权重函数” $d\tau/d\ln p$ 随高度的分布如图1所示。这些“权重函数”的分布特征同 CO_2 测温通道的“权重函数”的分布特征非常相似。这是必然的,因为史密斯等把测温 and 测湿作了同样处理。根据这些“权重函数”分布的图形,他们认为这组通道很不错,以为他们可以分别反映不同高度的湿度变化情况、每一个通道的测值都将对遥测湿度有相当重要的贡献。但是,实际应用 SIRS-B 资料所得到的反演结果^[2]并不如此,用全部六个遥测通道同只用三个遥测通道(531.5cm^{-1} , 291.5cm^{-1} 和 280cm^{-1}),甚至只用二个遥测通道

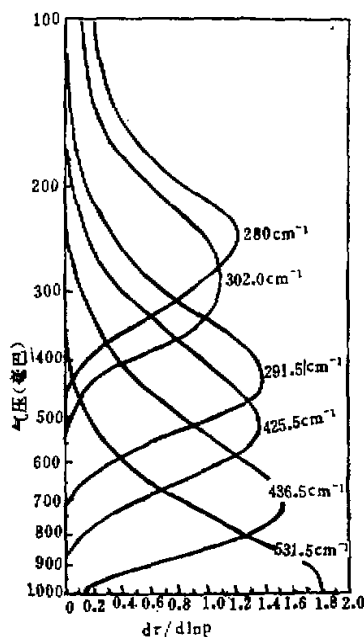


图1 SIRS-B水汽通道的“权重函数” $d\tau/d\ln p$

(531.5cm⁻¹ 和 291.5cm⁻¹) 的资料, 其结果没有多少差别。表 1 给出的是不同通道组合情况下反演结果在不同高度上的均方根误差(单位为克/厘米³)。表中第 2 列是单用 531.5 cm⁻¹ 通道的辐射资料反演的均方根误差, 第 3、4、5 列分别是用两个通道(531.5cm⁻¹, 291.5cm⁻¹)、三个通道(531.5cm⁻¹, 291.5cm⁻¹, 280cm⁻¹) 和四个通道(531.5cm⁻¹, 425.5 cm⁻¹, 291.5cm⁻¹, 280cm⁻¹) 的辐射量进行反演的均方根误差, 最后一列是用全部六个通道的辐射资料反演的均方根误差。比较这些结果可以很清楚地看到, 使用更多的通道其结果并没有什么明显的改进, 而仅仅用 531.5cm⁻¹ 一个通道的资料来反演湿度垂直分布, 其结果在对流层中下层已非常接近采用多通道时的精度。

表 2 不同数目的通道组合情况下, 由 SIRS-B 资料所得到的湿度廓线的均方根误差^[2]:

高 度 通 道	一 通 道 (1)	二 通 道 (1, 4)	三 通 道 (1, 4, 6)	四 通 道 (1, 3, 4, 6)	六 通 道 (1-6)
200mb	0.0128	0.0092	0.0086	0.0086	0.0099
300mb	0.0127	0.0104	0.0103	0.0103	0.0166
500mb	0.0594	0.0452	0.0450	0.0445	0.0641
700mb	0.172	0.165	0.165	0.160	0.162
850mb	0.244	0.245	0.245	0.245	0.243
1000mb	0.309	0.309	0.309	0.309	0.307

为什么会是这样的呢?

“任何运动形式, 其内部都包含着本身特殊的矛盾。这种特殊的矛盾, 就构成一事物区别于他事物的特殊的本质。”而“不同质的矛盾, 只有用不同质的方法才能解决。”我们必须对红外测温问题的特殊性作充分的分析, 从而找到解决红外测温问题的合理途径。

大气湿度垂直分布的遥测与大气温度垂直分布的遥测虽有类似之处, 但还有原则的差别, 不能笼统地把测温的一套方法完全照搬到测温上去。在测温方法中, 是在辐射物质垂直分布已知的条件下, 通过测量射出辐射量间接地推算温度垂直分布。而在测温的时候, 却是在温度分布已知的条件下, 通过射出辐射量的测量间接推算辐射物质(水汽)的垂直分布。

对于温度垂直分布的遥测, 一般可以把辐射传递方程写成

$$I_\nu = B_\nu(\zeta_s)\tau_\nu(\zeta_s) + \int_{\zeta_s}^{\infty} B_\nu(\zeta) \frac{\partial \tau_\nu}{\partial \zeta} d\zeta \quad (1)$$

这里我们取 $\zeta = \ln(p_s/p)$ 为垂直坐标, p 表示气压, 下标 s 表示地面上的值, I_ν 为卫星上由通道 ν 所测得的辐射量, $\tau_\nu(\zeta)$ 为通道 ν 的透过率, $B_\nu(\zeta) = B_\nu[T(\zeta)]$ 为普朗克函数, T 为绝对温度。由 (1) 式可见, 如果吸收辐射的气体的分布已知, 权重函数 $d\tau_\nu(\zeta)/d\zeta$ 一般可视为已知, 只要吸收辐射的气体在频段 ν 有吸收和辐射作用, 则总有 $d\tau_\nu(\zeta)/d\zeta > 0$, 即不论辐射物质的分布如何, 吸收气体的自身辐射总可以提供出有关温度垂直分布 $B_\nu[T(\zeta)]$ 的信息; 因此红外遥测温度垂直分布也就总是可能的。

对于湿度垂直分布的遥测来说, 水汽含量的信息包含在 $\tau_\nu(\zeta)$ 中, 并不在 $B_\nu[T(\zeta)]$ 中, 因此不能再像测温时那样把 $d\tau_\nu(\zeta)/d\zeta$ 视为“权重函数”。这时辐射传递方程可改为:

$$I_\nu = [I_\nu - B_\nu(\zeta_s)]\tau_\nu(\zeta_s) + B_\nu(\infty) - \int_{\zeta_s}^{\infty} \tau_\nu(\zeta) \frac{\partial B_\nu(\zeta)}{\partial \zeta} d\zeta \quad (2)$$

假定地面为黑体,则上式右端第一项为零。因此,只有当 $dB_v(\zeta)/d\zeta \approx 0$ 时,辐射量 I_v 的测量才能给出水汽含量的信息,可推算出湿度的垂直分布。这也就是说,卫星红外测温法只有当 $\partial T(\zeta)/\partial \zeta \approx 0$ 时才可能是有效的。

由(1)式不难看出, $d\tau_v(\zeta)/d\zeta$ 的分布说明的是辐射值 I_v 对于不同高度上温度变化(即 $B_v(\zeta)$ 的变化)的敏感程度,其极大值的高度 ζ_v 就是所谓“有效辐射层”,它表明 I_v 对于 ζ_v 高度处的温度变化最敏感。因此按曲线 $d\tau_v(\zeta)/d\zeta$ 的分布选取测温通道是合理的。但 $d\tau_v(\zeta)/d\zeta$ 的分布并不能说明辐射值 I_v 对于不同高度上湿度变化的敏感程度, ζ_v 高度也不表明 I_v 对该处湿度变化最敏感。例如在等温情况下, $dB_v(\zeta)/d\zeta = 0$, 由(2)可知,这时任何通道都不反映水汽垂直分布的情况。但是,按(1)式仍可计算出“权重函数” $d\tau_v(\zeta)/d\zeta$, 仍有“有效辐射层”,然而事实上这种“有效辐射层”丝毫不反映水汽变化的情况。因此,如果沿用测温方法来计算“权重函数”及“有效辐射层”,并按此选取湿度垂直分布的遥测通道,显然是不合适的。针对水汽垂直分布的红外遥测问题,曾庆存提出了“最佳信息层”概念。对于水汽来说,称 ζ^* 是通道 ν 的“最佳信息层”,是指通道 ν 的辐射测值 I_v 对高度 ζ^* 处的水汽含量的变化最敏感,因此这个通道也就主要提供这一层水汽变化的信息。

由(2)式可以有

$$\delta I_v = (I_{v0} - B_v(\zeta_v))\delta\tau_v - \int_0^\infty \frac{\partial B_v(\zeta)}{\partial \zeta} \delta\tau_v(\zeta) d\zeta. \quad (3)$$

我们取水汽透过率公式为

$$\tau_v = \exp(-L_v^* W_v^*), \quad (4)$$

这里

$$W_v^* = \left[\int_0^p g^{-1} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{n_v/m_v} q(p) R(T) dp \right]^{m_v} = M(p)^{m_v},$$

$$q(p) = q_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^r,$$

$$R(T) = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\epsilon_v - 0.625}.$$

取 $r = 3.5$ 。而 L_v^* 、 m_v 、 n_v 和 ϵ_v 是与波数有关的系数, $q(p)$ 是水汽混合比。

如果不考虑吸收系数 L_v^* 的自加宽影响,则有

$$\begin{aligned} \delta\tau_v &= -L_v^* \tau_v \delta W_v^* \\ &= -L_v^* \tau_v m_v [M(p)]^{(m_v-1)} \int_{\zeta}^\infty \frac{p}{g} e^{-\left(\frac{n_v}{m_v}+1\right)K^*} R(T) \delta q(\zeta') d\zeta'. \end{aligned} \quad (5)$$

代入(3)式,我们就可以得到辐射值的偏差 δI_v 和水汽含量的偏差 $\delta q(\zeta)$ 有如下关系

$$\delta I_v = \int_0^\infty K_v^*(\zeta) \delta q(\zeta) d\zeta. \quad (6)$$

其中 $K_v^*(\zeta) = K_{v1}^*(\zeta) + K_{v2}^*(\zeta)$ 可称为(湿度遥测的)“权重函数”,且有:

$$K_{v1}^*(\zeta) = \frac{L_v^* m_v p_0 q_0}{g} e^{-\left(\frac{n_v}{m_v}+r+1\right)K^*} R(T) \int_0^\zeta \frac{\partial B_v(\zeta')}{\partial \zeta'} \tau_v(\zeta') [M(p_s)]^{(m_v-1)} d\zeta', \quad (7a)$$

$$K_{v2}^*(\zeta) = -\frac{L_v^* m_v p_0 q_0}{g} (I_{v0} - B_v(\zeta_v) \tau_{v0} [M(p_s)]^{(m_v-1)} \cdot e^{-\left(\frac{n_v}{m_v}+r+1\right)K^*} \cdot R(T). \quad (7b)$$

对于红外波较, 一般可认为 $I_{\nu} \approx B_{\nu}(\zeta)$, 因此 $K_{\nu}^*(\zeta) \approx K_{\nu}^*(\zeta)$. 由 (6) 式可见, $|K_{\nu}^*(\zeta)|$ 有最大值的高度 ζ^* , 就是通道 ν 的“最佳信息层”. 由 (7a) 显然有

$$\lim_{\zeta \rightarrow 0} K_{\nu}^*(\zeta) = 0. \quad (8)$$

又因 $r_{\nu} \leq 1$ 有界, 若 $\left| \frac{\partial B_{\nu}(\zeta)}{\partial \zeta} \right|$ 有界, 设最大值为 $\left| \frac{\partial B_{\nu}}{\partial \zeta} \right|_M$, 则有:

$$\lim_{\zeta \rightarrow \infty} |K_{\nu}^*(\zeta)| \leq \lim_{\zeta \rightarrow \infty} \left[\frac{p_i L_{\nu}^* q_{\nu} m_{\nu}}{g} R(T) \left| \frac{\partial B_{\nu}}{\partial \zeta} \right|_M |M_{\nu}(\zeta)^{(m_{\nu}-1)}|_M e^{-\left(\frac{m_{\nu}}{m_{\nu}+1} + i\right)\zeta} \right] = 0. \quad (9)$$

在大气中一般有 $\partial B_{\nu}(\zeta)/\partial \zeta < 0$, 则 $K_{\nu}^*(\zeta) \leq 0$, 故 $(-K_{\nu}^*(\zeta))$, 亦即 $[-K_{\nu}^*(\zeta)]$, 必在中间某层 ζ^* 处达极大值.

图 2 中的实线是我们按“最佳信层”概念所计算的几个水汽转动带通道(通道宽度为 5cm^{-1} 左右)的“权重函数” $K_{\nu}^*(\zeta)$ 的分布, 其极大值高度就是“最佳信息层”. 图中的虚线是按测温方法所计算的相应通道的“权重函数” $d\tau_{\nu}(\zeta)/d\zeta$ 的分布. 计算中我们取中纬度地区的一般温度和湿度分布作为标准状态. 比较这两种“权重函数”可以看出它们有不少差异. 首先, “最佳信息层”同“有效辐射层”不一致, 前者位置较后者高. 其次, 地面上所有通道的 $|K_{\nu}^*(\zeta)|$ 值为零, 而地面上 $d\tau_{\nu}(\zeta)/d\zeta$ 值并非都为零, 较透明通道的 $d\tau_{\nu}(\zeta)/d\zeta$

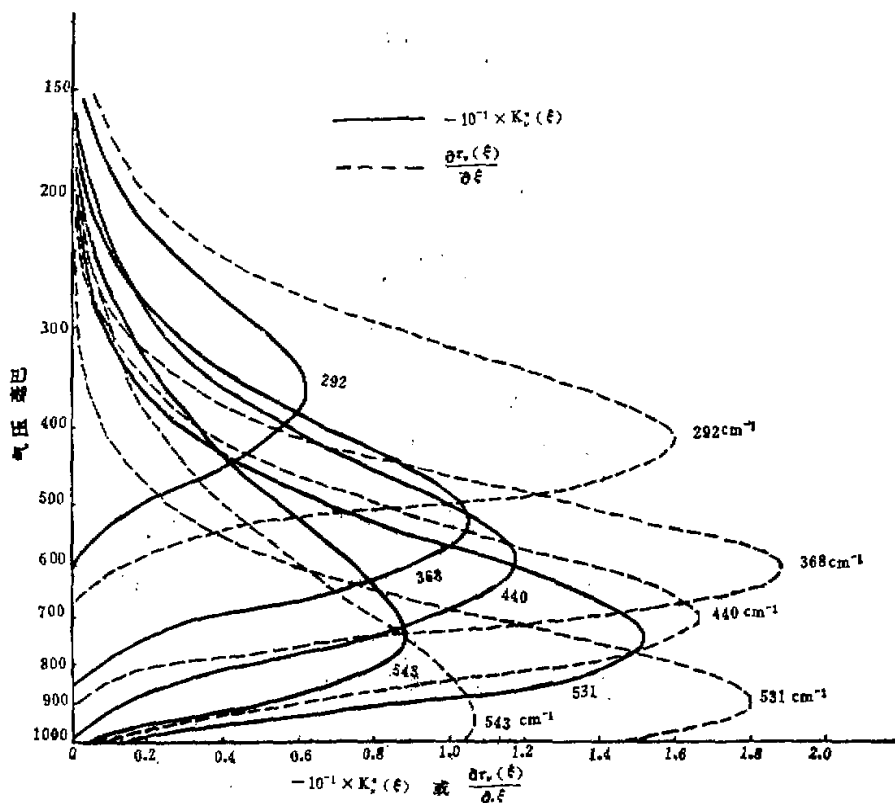


图 2 一些水汽转动带通道的 $K_{\nu}^*(\zeta)$ 和 $d\tau_{\nu}(\zeta)/d\zeta$.

值在地面上还很大。第三,由各通道的 $|K^*(\zeta)|$ 值分布可以看到, 531cm^{-1} 通道具有特殊的性质,其“最佳信息层”最低, $|K^*(\zeta)|$ 值又最大,因此可以认为位于 531cm^{-1} 附近的通道是最基本的通道。其他有些通道的 $|K^*(\zeta)|$ 曲线几乎包含在 531cm^{-1} 通道的 $|K^*(\zeta)|$ 曲线之内,相对来讲这些通道似乎就无甚意义,甚至可以不必采用它们。

根据“最佳信息层”概念计算的“权重函数” $K^*(\zeta)$ 的性质,我们就不难解释在测湿试验中所存在的问题。

由 SIRS-B 资料推算的湿度垂直分布,很清楚地表明 531.5cm^{-1} 通道确是最基本的测湿通道, 531.5cm^{-1} 加上 291.5cm^{-1} 通道或者再加上 280cm^{-1} 通道便可以基本上反映湿度的垂直分布,但如果没有 531.5cm^{-1} 通道的资料,其反演误差就显著增大。这一事实是无法用按“有效辐射层”概念计算的“权重函数” $dr_e(\zeta)/d\zeta$ 来解释的,然而它恰好证明了按“最佳信息层”概念计算“权重函数” $K^*(\zeta)$ 、并由此选取通道的合理性及可靠性。

这里还须指出,根据实际大气中湿度垂直分布的统计分析,对于中、高纬度地区湿度的垂直分布,一般需要 4—6 个参数才能较好描写其细微特征,因此,为了确定这 4—6 个参数,就需要用 4—6 个通道来进行辐射测量。但是,由上面的分析讨论可见,各通道的 $K^*(\zeta)$ 之间有相当大的相关。计算表明,如果辐射测值有 1% 的误差,则很难选出 4—6 个不相关的通道。因此,即使多选了通道,其中一些也没有多大用处,比用 2—3 个通道好不了多少。这里就存在着一个需要与可能的矛盾,这个矛盾也就限制了用红外法遥测大气湿度垂直分布的精度。要想由遥测辐射资料确定更多的水汽分布参数,就要大大提高仪器的测量精度。

还有, SIRS-B 遥测大气湿度垂直分布的试验还发现,尽管有 6 个通道,而且按照“有效辐射层”的概念, 531.5cm^{-1} 和 436.5cm^{-1} 两个通道本应都能反映大气低层的水汽状况,然而试验结果并非如此,对流层最低层水汽垂直分布遥测精度比较差。史密斯等^[9]把原因归结为还没能用更透明的通道,因此还企图按“有效辐射层”概念去找“有效辐射层”更低的通道。

然而,根据“最佳信息层”概念和我们给出的一些通道的“权重函数” $K^*(\zeta)$ 的空间分布,任何通道的 $K^*(\zeta)$ 在近地面都迅速趋于零,即任何通道都不能给出地面附近水汽含量的可靠信息。同时,尽管可以按测温的同样办法找到“有效辐射层”更低的那些更透明通道,但这对测湿来说毫无用处,因为对于水汽分布变化状况敏感的“最佳信息层”即使是更透明通道也在 800 毫巴以上,甚至比 531cm^{-1} 通道的“最佳信息层”还高,而且其“权重函数”的绝对值还较小,它既不能提供更多的近地面层水汽含量的信息,也不能提供其他各层水汽含量的补充信息,它也就没有什么用处。因此,为了遥测对流层低层的水汽分布,企图根据“有效辐射层”概念挑选更透明通道的努力,不会有什么好结果。

大气中的水汽大部分集中在对流层低层,但用红外法又不能准确遥测出大气低层的水汽垂直分布,这是红外法在湿度垂直分布遥测上的又一重大局限。为了准确遥测出大气湿度的垂直分布,除了红外法外,看来还需有其他方法配合使用。例如在海洋上空,对于微波区, $I_w \approx 0.5 B_w(\zeta_w)$,故可用微波辐射计提供出对流层低层的水汽分布的信息。但在大陆上,微波法也存在和红外法同样的问题。

上面我们简要地讨论了红外遥测大气湿度垂直分布与红外遥测温度垂直分布的区别,讨论了红外遥测湿度垂直分布的通道选择以及红外遥测湿度垂直分布的可能性和局

限性,正确解释了已有的实验结果。我们的理论分析和国外的实验结果表明,在现有技术水平条件下,用红外法遥测湿度垂直分布可以收到一定效果,但只能合理地选用 1—3 个通道。或者极简单地,就用一个通道测量水汽的自身辐射,再应用水汽垂直分布的经验规律,推算出垂直气柱内单位面积上的水汽总含量,推算出湿度垂直分布的近似廓线。要想较全面和较好地测量出对流层低层的湿度垂直分布,则还需寻求另外的方法,作进一步的研究。

参 考 资 料

- [1] W. L. Smith, *Appl. Optics*, 1970, **9** (9).
- [2] W. C. Shen and W. L. Smith, *Monthly Weather Rev.*, 1973, **101** (1).
- [3] W. L. Smith and H. B. Homell, *J. Appl. Met.*, 1971, **10** (5).