

8.6 毫米和 3.2 厘米两个波长地面 辐射计探测云中含水量

魏重 林海 忻妙新*

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文讨论了在地面上用 8.6 毫米和 3.2 厘米两个波长辐射计测量云中路径平均含水量的方法,通过数值实验和实际野外观测证明了该方法的可行性。给出了较好的观测结果并对测量误差做了讨论。同时,比较了两个波长辐射计测云中含水量的能力,指出了它们各自的测量适用范围和局限性。

一、前 言

微波辐射计在探测云雾、降水方面的优越性越来越被人们所认识,在星载微波辐射计获得海洋上空云中含水量和雨强分布的同时,相应的地面遥测工作也在进行,1968年 Lhermitte^[1] 提出了被动地面遥感云中含水量的可能性。1970年 Decker^[2] 等人导出了测云的简化方程,利用地面 2.8 厘米波长的 Dicke 辐射计成功地探测到降水雷暴单体中路径积分含水量的时一空分布。后来苏联中央高空观象台也发表了^[3] 两个波段(8 毫米和 1.35 厘米)垂直对天空观测降水云和非降水云的亮温值。这些工作是地面微波辐射计进行云雾遥测的一些初步试验。我们也曾通过对比试验和误差分析,说明微波辐射计探测地面降水路径平均雨强的可靠性^[4]。在此基础上,本文对微波辐射计探测云中含水量的原理作了进一步探讨,得到一个与文献[4]中测雨公式相似的测云中含水量的简化公式,还对公式的适用范围做了数值试验,讨论了测量误差。并于 1980 年夏季用自行研制的双波长雷达-辐射计系统进行了云中路径平均含水量的观测实验,得到了较好的结果。

二、辐射计探测的亮度温度和云柱积分含水量的关系

在微波波段,辐射计接收到的来自空间某方向上大气和云的微波辐射总量一般可以用微波亮度温度 T_b 来表示。在无源、水平均一、无散射大气的假定下,由辐射传输方程可以推得 T_b 的表达式如下:

1981 年 1 月 21 日收到修改稿。

* 还有郝跃奎、邹寿祥以及张瑞生等参加了观测工作。

$$T_b(\lambda, \theta) = \int_0^{\infty} T(r) [\alpha_{O_2}(r, \lambda) + \alpha_{H_2O}(r, \lambda) + \alpha_{CL}(r, \lambda)] \cdot \exp \left\{ - \int_0^r [\alpha_{O_2}(r, \lambda) + \alpha_{H_2O}(r, \lambda) + \sigma_{CL}(r, \lambda)] dr \right\} dr \quad (1)$$

式中 λ 为辐射计的波长, θ 为辐射计天线指向与水平面之间的夹角(仰角), r 为辐射计到路径上各点的距离矢量, dr 是沿路径的积分元量, $T(r)$ 是 r 处的温度, α_{O_2} 和 α_{H_2O} 分别是大气氧气和水汽的吸收系数, α_{CL} 和 σ_{CL} 分别是云的吸收和衰减系数。

为了了解 8.6 毫米和 3.2 厘米两波长辐射计的测量动态范围, 我们选用一批实测云谱资料, 根据 (1) 式逐份做了模式计算, 然后点聚得到各波长的探测亮温 T_b 与路径积分含水量 G 之间的关系。模式假定在球面分层, 水平均一的晴空背景大气上, 有一层均匀、连续云层复盖。云底距地面 1 公里, 云厚 4 公里, 云中各处滴谱相同, 云内温、湿、压与云外大气一样。具体计算时, 氧气和水汽吸收系数是按照 [5] 中公式根据气候平均探空资料求得的, 云的吸收和衰减系数是根据 Mie 散射公式^[6]按照实际云谱进行积分求得。在对 (1) 式积分时对积分路径元 dr 进行了地球曲率和大气折射率订正。

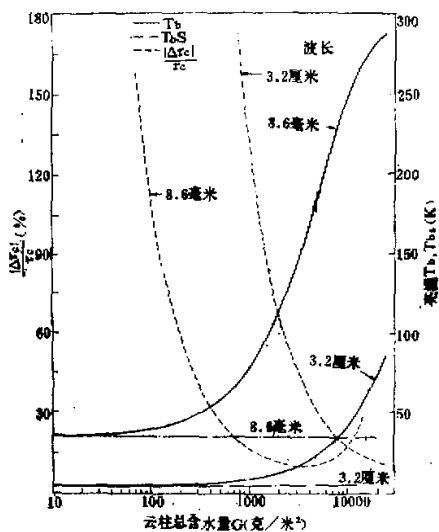


图 1 垂直探测时亮温 T_b 及 τ_c 的相对误差

$\frac{\Delta T_b}{T_b}$ 随 G 的变化曲线

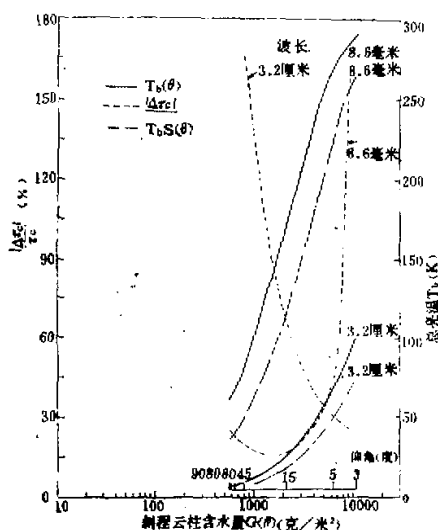


图 2 斜程探测时 T_b , T_b , 及

$\frac{\Delta \tau_c}{\tau_c}$ 随仰角的变化

垂直探测时, 两个波长的辐射计所测的亮度温度 T_b 随路径上单位面积云柱总含水量 G 的变化曲线在图 1 中以实线表示。一般来说, 只有亮温 T_b 随云层含水量 G 的变化率 $\frac{\Delta T_b}{\Delta G}$ 值较大时, 亮温值才能灵敏地反映出云层含水量的变化。由图中曲线可见, 对应于每个波长的 T_b 都有其各自的随 G 值变化的敏感区域, 亦即两个波长辐射计都有其各自的较佳探测范围, G 值从 230 到 10000 克/米² 之间, 8.6 毫米波长的 $\frac{\Delta T_b}{\Delta G}$ 值较大。而在 3.2

厘米波长, 只有当 G 值大于 2700 克/米² 时才能较好地探测, 低于此值的云几乎无法分辨。根据国内某些地区对云厚和云中含水量测量的估算表明, 淡积云 $G \sim 250$ 克/米², 浓积云 $G \sim 2000 \sim 8000$ 克/米², 北方冬季高层一雨层云 $G \sim 500$ 克/米² (液水部分)。因此, 在垂直探测时, 8.6 毫米波长辐射计比 3.2 厘米波长辐射计有更宽的可测范围, 它基本上适用于各类水云的探测, 而 3.2 厘米波长辐射计只适用于浓积云或 C_b 云等 G 值较大的云的探测。图 1 还表明, 当 G 值超过 10000 克/米² 时, 8.6 毫米波长的 T_b 值趋于“饱和”。

斜程探测时, 两个波长辐射计探测的有云亮温 T_b 和无云背景亮温 T_{br} 随仰角的变化曲线在图 2 中以实线表示。图中横坐标是对应路径上单位面积云柱总水量 $G(\theta)$, 它与垂直探测时的云柱总含水量 $G(90)$ 的关系为 $G(\theta) = G(90) / \sin \theta$, 图中对应的 $G(90) = 560$ 克/米²。 $G(\theta)$ 相应的仰角值也一并标出。由图可见, 仰角越低背景亮温值越大, 8.6 毫米波长背景亮温在垂直探测时为 35K 而低仰角时可高达 250K 以上。由此, 低仰角探测时, 亮温饱和现象出现时所对应的云层含水量 G 值要比垂直探测时为小。例如图中 8.6 毫米 T_b 曲线当 $G(\theta)$ 超过 5000 克/米² (而不是图 1 中的 10000 克/米²) 时就已表现出饱和的趋势。因此应避免在低仰角用 8.6 毫米辐射计对 G 值大的云层进行探测, 这时一般用 3.2 厘米辐射计进行探测为宜。

三、辐射计测云的简化公式及其适用范围

将 (1) 式进行一定的简化, 就可以得到云层的微波路径衰减量的表达式, 由此可进一步推得云层的路径积分含水量。所谓云的微波路径积分衰减即光学上称为光学厚度的量, 我们用 τ_c 表示。

把整层大气分为地面到云底、云层所占空间及云顶以上大气这样三段, 令 $\bar{T}_1, \bar{T}_2, \bar{T}_3$ 分别为各段的平均温度, 并假定云中粒子与波长相比足够小, 可以用云的吸收系数代替衰减系数。这时采用与文献 [4] 中关于雨的衰减推导相类似的方法, 即可得到云层的光学厚度

$$\tau_c(\lambda, \theta) = -L_N \left[1 - \frac{T_b(\lambda, \theta) - T_{br}(\lambda, \theta)}{\bar{T}_1 + (\bar{T}_2 - \bar{T}_1)e^{-\tau_{10}} - T_{br}} \right], \quad (2)$$

式中 $e^{-\tau_{10}}$ 为沿探测路径方向地面到云底一段的大气透过率, 其余符号均与前面意义相一致。

若单位含水量云的吸收系数 (即比吸收系数) 为 τ_c , 沿路径云原为 L , 则可求得探测方向上单位面积云柱总含水量 $G(\theta)$ 和路径平均含水量 $\bar{w}(\theta)$,

$$G(\theta) = \frac{\tau_c(\lambda, \theta)}{\tau_c(\lambda, \bar{T})}, \quad (3)$$

$$\bar{w}(\theta) = G(\theta) / L, \quad (4)$$

其中 $\bar{T}$ 是云层等效温度, 一般以云的平均温度 $\bar{T}_2$ 代替。图 3 是两波长上 τ_c 随温度的变化曲线, 它是由实际云谱用 Mie 理论计算后回归得到的。

综上所述, 公式 (2)、(3) 和 (4) 构成了用辐射计测量单位面积云柱总含水量 (或路径平均含水量) 的一组简化公式。

简化公式(2)的推导中做了瑞利近似的假定,取云的吸收系数等于衰减系数。但是,

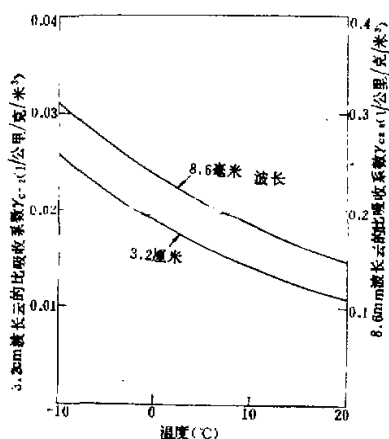


图3 云的比吸收系数 γ_c 随温度的变化曲线

实际云中往往有一些几百至上千微米直径的滴存在,这时瑞利近似就不一定适用了,采用简化公式探测会产生一定的误差。为了考查简化公式对不同云进行探测时的误差,我们通过模式计算分别统计了探测非降水云和混合云谱时,简化公式所测含水量对含水量真值的百分误差(Δ),结果列于表1中。

表1中所选392份非降水云谱是庐山地面云雾站从Sc, Cu等类云的下部或边缘的取样,一般谱的最大滴径不超过100微米。对于我们所用的两个波长,这些云滴无疑是满足瑞利近似条件的。表内非降水云谱一栏中,在3.2厘米波长上简化公式对全部非降水云谱探测的误差都在5%以内,8.6毫米波长上 $\Delta < 5\%$ 的谱也占总数的95%,这正是瑞利近似适用这一物理本质的反映。至于8.6毫米波长上有占总数不到百分之五的云谱 Δ 是大于5%的,其原因并不是云中粒子不符合瑞利近似,而是这些谱的含水量都在2克/米³以上,相应整层G值较大,亮温趋于饱和而造成较大误差。即使这时,误差也在25%以下。可见,在两波长上用简化公式探测非降水云都是有足够精度的。表中混合谱一栏所用152份谱,是将飞机穿云所得的152份大云滴谱分别与同一小云滴谱相连接而得到的。所用小云滴谱含水量是0.14克/米³,谱的平均直径为5.8微米,最大滴径为26微米。152份大云滴谱所测最小粒子为33微米。每份谱的最大滴径由120微米到2710微米不等,平均滴径在600到700微米之间,

表1 简化公式测云含水量的百分误差 Δ 统计

波 长	Δ	8.6 毫米				3.2 厘米			
		$\Delta < 5\%$	$5\% < \Delta < 10\%$	$10\% < \Delta < 25\%$	$\Delta > 25\%$	$\Delta < 5\%$	$5\% < \Delta < 10\%$	$10\% < \Delta < 25\%$	$\Delta > 25\%$
非降水云谱 (392 份)	份数	374	11	7	0	392	0	0	0
	百分比	95.4	2.8	1.8	0	100	0	0	0
混合谱 (152 份)	份数	123	5	7	17	130	8	5	9
	百分比	81.1	3.3	4.6	11.0	85.6	5.2	3.3	5.9

平均含水量为0.023克/米³。从表1混合谱一栏中可以看到,即使云中存在着几百至上千微米的水滴,多数情况下(百分之八十以上)简化公式的百分误差仍小于5%。进一步考查混合谱中 $\Delta > 10\%$ 的那些个例,发现对3.2厘米波长来说,他们都是一些最大滴径大于1000微米的谱,对于8.6毫米波长来说,它们都是最大滴径超过717微米的谱。显然,这时由于谱中存在着比上述尺度还要大的滴,使得瑞利近似不再适用,引起了简化公式测量的较大偏差。由上面分析可见,对于混有雨滴的云,只要滴径在0.7到1毫米以下,简

化公式仍有相当高的精度, 还应看到, 在混合谱中上述瑞利近似适用的尺度上限是随小滴和大滴之间权重不同而变化的, 小滴部分权重越大, 谱的瑞利近似适用的尺度上限也越大。必须指出, 我们所用混合谱与云中实际的大、小滴混合情况相比, 混合谱的小滴部分的权重是偏小很多的。即使这样, 简化公式对存在将近 1 毫米雨滴的云探测, 仍有相当高的精度, 那么, 对实际降雨云进行测量时简化公式将在更大的粒子尺度范围内保持高的精度。换句话说, 用 8.6 毫米和 3.2 厘米辐射计根据简化公式测非降水云及雨强不太大的降水云时都有较高的精度, 只是对较强的降水云探测时精度才会下降。

四、实验观测结果及误差估计

1980 年 6 月至 9 月在河北省香河县中国科学院大气物理研究所香河观测站进行了实验观测。观测仪器是我们自行研制的双波长辐射计-雷达联合系统。雷达用于云的定位和云厚的测量。观测结果分为下列三类:

(1) 浓积云或积雨云的路径总含水量的空间分布 8 月 8 日午后用双波长辐射计同时观测一发展较强的 C_u 云, 得到了它的沿观测路径总含水量分布的等值线图, 表示于图 4 中。图中横坐标是方位角, 纵坐标是仰角。8.6 毫米波长的等值线以虚线表示, 3.2 厘米波长测量结果等值线用实线表示。图中两个波长辐射计各自的测量结果反映出的含水量结构是相当一致的, 两个波长的高值区和低值区对应得比较好。路径平均含水量的数值在量级上与其他一些积状云中含水量的观测结果也是一致的。另外的几次用 8.6 毫米辐射计测量得到的路径平均含水量空间分布个例, 也都得到了分布和数值上都合理的结果。这些结果有力地表明微波辐射计遥测对流云中含水量结构的能力。

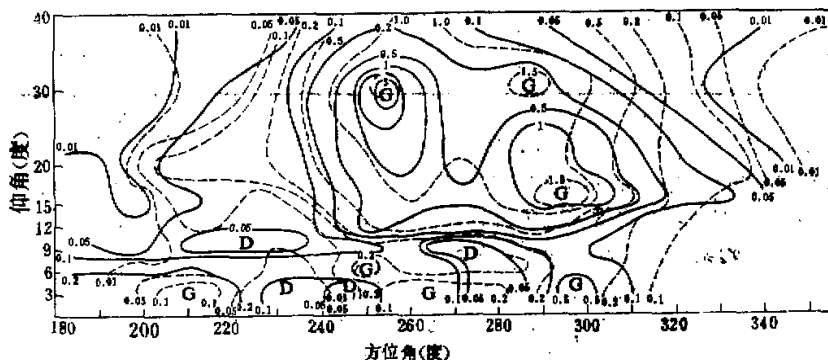


图 4 积雨云路径平均含水量空间分布的等值线图

实线: 3.2 厘米, 虚线: 8.6 毫米。单位: 克/米³。1980.8.8.13¹¹—13²⁰。

(2) 云的垂直方向总含水量的水平结构 当云移过天顶时, 辐射计垂直探测到的亮温值随时间的变化, 实际上反映了云中垂直路径积分含水量的水平结构。图 5 是 7 月 10 日高积云过顶时的实例。图中横坐标是云的水平距离, 它是根据云所在高度上当日探空的风速当作云速换算的。图中实线是所测云的亮温曲线, 虚线是最后求得的垂直方向上

单位面积云柱总含水量,单位是克/米²。图中表明这块云中心路径积分含水量可达 3000 克/米²以上,同时也反映出高积云的垂直路径总水量在水平方向是不均匀的。

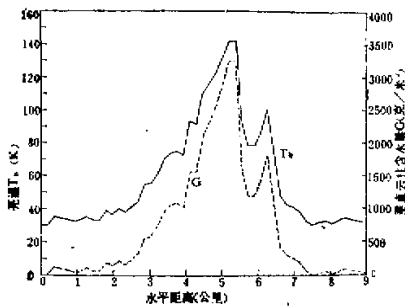


图 5 高积云垂直路径含水量的水平分布

A_c 或 A_s 云的路径积分水量大 3 倍到 5 倍,这些结果对研究云雾含水量以及电波传播问题都是有一定意义的。

表 2 层状云的路径总含水量和 8.6 毫米波长的衰减

仰 角	云 型	τ_c	G (克/米 ²)	平均次数
$60^\circ < \alpha \leq 90^\circ$	A_c	0.0413	197.8	4
	A_s	0.0186	100.5	8
	雾 ($S \geq 200$)	0.105	593	2
$30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	A_c	0.0495	214.5	8
	A_s	0.054	285	4
	雾 ($S \geq 200$)	0.116	772	2
$\alpha \leq 6^\circ$	A_c	0.311	1481	1

最后,我们讨论实验观测误差。由公式(3)可知,云柱积分含水量的测量误差主要是云的光学厚度 τ_c 和单位含水量云的吸收系数 γ_c 的测量误差造成的。当云中无大雨滴存在时, γ_c 误差是由云的等效温度 $\bar{T}$ 的误差引起的。由图 3 可以看出,若等效温度的误差为 5K,造成 γ_c 的百分误差约 10—15%。

关于 τ_c 的误差,可根据公式 2 求得 τ_c 的误差传递公式

$$\frac{|\Delta \tau_c|}{\tau_c} = \frac{1}{\tau_c} \left[\left| \frac{\Delta(T_b - T_{br})}{\bar{T}_1 + (\bar{T}_2 - \bar{T}_1)e^{-\tau_{10}} - T_b} \right| + \left| \frac{T_b - T_{br}}{\bar{T}_1 + (\bar{T}_2 - \bar{T}_1)e^{-\tau_{10}} - T_b} \cdot \frac{\Delta A}{A} \right| \right], \quad (5)$$

其中 $A = \bar{T}_1 + (\bar{T}_2 - \bar{T}_1)e^{-\tau_{10}} - T_b$,

$$|\Delta A| = |\Delta \bar{T}_1| + |\Delta T_{br}| + |e^{-\tau_{10}} \Delta(\bar{T}_2 - \bar{T}_1)| + |(\bar{T}_2 - \bar{T}_1) \Delta e^{-\tau_{10}}|.$$

考虑测量误差,令 $|\Delta \bar{T}_1| \sim 2K$, $\Delta(\bar{T}_2 - \bar{T}_1) \sim 2K$, $\Delta e^{-\tau_{10}} \sim 0.1$, $\Delta T_{br} \sim 3K$, $|\Delta(T_b - T_{br})| \sim 5K$,求得相应的垂直探测和斜程探测时 τ_c 的相对误差曲线分别在图 1 和图 2 中

以虚线表示。图中 $\frac{|\Delta r_c|}{r_c}$ 在两个波长上有其各自对应的高值和低值区域。在第二节中我们已结合图1、图2详细地讨论了两辐射计各自的测量适用范围, 在这里分别将两图中同一波长的虚线与实践线相对照, 可以发现对每个波长来说, r_c 相对误差较小时对应的 G 值区域都与该波长辐射计测量适用时对应的 G 值范围相一致。相反, 当某个波长辐射计探测不适用时, 虽然仪器的绝对误差没变, 图中 r_c 的相对误差却变得很大。例如 3.2 厘米波长辐射计垂直探测时(图1), 当云的 G 值小于 1000 克/米² 时, r_c 的相对误差在 150% 以上。又如 8.6 毫米波长辐射计斜程探测时(图2), 当仰角在 3° 以下时, r_c 相对误差也超过 150%。对于上述这两种 r_c 相对误差较大的情况, 在观测时应注意加以避免。从两图中 r_c 相对误差曲线还可以看到, 当一个波长的探测误差较大时, 刚好另一个波长却处于探测的较佳范围内。因此, 用两个波长辐射计同时探测, 互相取长补短, 将会得到比较理想的结果。

五、结 论

1. 本文提出了一种用微波辐射计测云路径总含水量的方法。数值实验表明这种方法对降雨云和非降雨云都是可用的, 对非降雨云或雨强不大的降雨云有较高的探测精度。据此, 用自制的双波长辐射计-雷达系统取得了较好的实验观测结果。

2. 模式计算和观测误差分析都表明, 在垂直探测或高仰角探测时, 8.6 毫米波长辐射计有较宽的测量范围和较高的探测精度, 因而它基本上适用于各类云的探测。这时 3.2 厘米波长辐射计却只适用于总路径含水量较大 ($G > 2700$ 克/米²) 的云的探测。

3. 在低仰角探测时, 若斜程路径含水量 G 值较大, 8.6 毫米辐射计会出现亮温饱和现象, 造成探测值相对误差增大。与此相反, 这时 3.2 厘米波长辐射计往往有较高的探测精度。为了得到理想的结果, 最好将两个波长辐射计结合起来使用。

致谢: 本文所用云滴谱资料是由中央气象局人工影响天气研究所和湖南省气象局提供, 在此表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Lhermitte, R. M., ISA transaction, 7(2), pp. 138—142, 1968.
- [2] Decker, M. T., et al., *J. Atmos. Sci.*, 27(5), pp. 785—790, 1970.
- [3] Горенук, А. Т., *Труды ЦАО*, 103, pp. 21—29, 1972.
- [4] 大气物理所 105 组, 大气科学, 第2卷 第4期, 314—322页, 1978.
- [5] 周秀骥等, 大气微波辐射和遥感, (待出版).
- [6] Deirmendjian, D., *Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions*, 1969.

MEASUREMENT OF LIQUID WATER CONTENT IN CLOUD BY DUAL-WAVELENGTH GROUND-BASED MICROWAVE RADIOMETER

Wei Zhong Lin Hai Xin Miao-xin

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

A dual-wavelength ground-based radiometer operating in 0.86 and 3.2 cm has been used to measure the integrated or mean liquid water content in cloud. Using actual cloud-drop spectra, the accuracy of liquid water determination is estimated. The merit and limitation of these two radiometers in cloud liquid water measurement are discussed. Quantitative analysis of their reliability is made, and their probing ability is compared with each other.