

微波遥感大气特性及天气变化

赵柏林 傅强 杜金林 胡成达 李慧心

(北京大学地球物理系, 北京 100871)

摘 要

本文介绍了用 5mm (52.9GHz, 54.5GHz), 1.35cm (22.235GHz) 和 8mm (35.3GHz) 微波辐射计遥感大气特性和天气变化, 评价全天候(不包括雨)遥感大气温度、压力层结、大气水汽含量及云中液态水量的能力及微波遥感监测天气变化的能力。文中还建立了遥感大气特性的方法, 用研制的微波辐射计系列在野外观测实验中, 证实晴天及阴天遥感大气温度、湿度、压力层结及云中液态水量的可行性。在监测天气变化中, 分析了微波遥感气团变化、云雨过程、大气扰动等内容, 它可供临近预报及人工降水中使用。

关键词: 遥感大气, 大气微波辐射

在中小尺度天气过程中, 气象要素随时间、空间有剧烈变化。利用地面微波辐射计系列, 可连续监测大气特性及天气变化。

在地面接收大气微波辐射亮度温度 T_B 为

$$T_B(\theta, \nu) = T_\infty e^{-\int_0^\infty \alpha \sec \theta dz} + \int_0^\infty T(z) \alpha \sec \theta e^{-\int_0^z \alpha \sec \theta dz} dz, \quad (1)$$

其中 T_∞ 是太空辐射亮度温度, θ 是天顶角, ν 是频率, $T(z)$ 是大气温度, z 是高度, α 是吸收系数, 而 $\alpha = \alpha_{O_2} + \alpha_{H_2O} + \alpha_{Cl}$, α_{O_2} , α_{H_2O} , α_{Cl} 分别是氧分子、水汽分子和云中液态水的吸收系数。

60年代以来, 利用大气微波辐射遥感大气及云雨特性, 在理论上和技术上都取得了很大进展^[1-11]。为了使微波遥感大气特性及天气变化更实用化。我们研制了新一代具有高性能的微波辐射计系列, 即 5mm (52.9GHz, 54.5GHz), 1.35cm (22.235GHz) 和 8mm (35.3GHz) 4频段微波辐射计联合观测, 进行了4次野外实验(时间: 1985年1—2月, 5—6月, 11—12月及1986年7月; 地点: 北京)。目的有二: (1)全天候(不包括雨)遥感大气温度、压力层结、大气水汽含量及云中液态水量的能力; (2)微波遥感天气过程(如云雨过程、小尺度扰动、气团变化)的能力。具备了这些能力后, 就可供探空、临近预报、人工降水中使用。本文讨论了用上述微波辐射计系列遥感晴天和云天大气温度、连续监测大气水汽含量及云中液态水量的方法, 将其结果和探空进行比较, 以验证方法的正确性。用连续观测资料对于天气过程作了分析。

一、云天大气温度的遥感方法

在全年中,有云天气占相当大的比重,从北京 1981—1983 年 5—6 月份地面资料,可以看出,总云量为 9 以上的天气占一半以上.云天遥感天气温度,就变得非常有实际意义.在 5mm (52.9GHz, 54.5GHz)波段,氧的吸收占主导地位,而云的影响是一个小量,云层对亮温的影响随天顶角增大而变小,对云高变化反应不敏感^[2].为了精确反演大气温度层结,寻求由(1)式导出云天大气亮度温度 $T_b(\theta, \nu)$ 与相应晴空大气亮度温度 $T'_b(\theta, \nu)$ 的关系.首先由云天天气气候资料,由辐射传输方程(1)算出云天 4 个频率: 54.5GHz, 52.9GHz, 35.3GHz 和 22.235GHz 的亮度温度 $T_b(\theta, 54.5)$, $T_b(\theta, 52.9)$, $T_b(\theta, 35)$, $T_b(\theta, 22)$ 作为测量值,并同时计算出 54.5GHz 和 52.9GHz 2 个频率相应的晴空亮度温度 $T'_b(\theta, 52.9)$ 和 $T'_b(\theta, 54.5)$ 作为因变量.统计回归晴空亮度温度与云天亮度温度间的关系,即对不同角度分别进行二次逐步回归,得到

$$T'_b(\theta, \nu) = f_{\theta, \nu}(T_b(\theta, 54.5), T_b(\theta, 52.9), T_b(\theta, 35), T_b(\theta, 22)), \quad (2)$$

其中 $\nu = 52.9\text{GHz}$ 和 54.5GHz , $f_{\theta, \nu}$ 是二次式,即包括各因子的一次项,二次项及交叉乘积项作为二次逐步回归选择因子得来的,其目的是考虑到由于展开后的非线性效果.

为了计算云天大气的亮温,除了需要历史探空资料外,还需要知道云高、云厚、云中含水量等参数.因此,必须作一些合理的假设,才能得到云天大气资料.

由 1981—1983 年 5—6 月份,从北京早、中、晚探空资料和地面资料,发现总云量为 10 的天数约占一半,而其中约 $\frac{1}{3}$ 是低云量为 10. 由于出现云的天数非常多,对比探空选择了 90 份较典型的资料,其中云出现的高度分别是 900hPa, 800hPa, 600hPa, 云厚取为 0.5km, 1km, 1.5km 和 2km. 根据我国各类云中含水量的观测资料,云中含水量取为 0.04, 0.1, 0.2g/m³, 云中液态水量(即积分含水量) L 分布为 0.02—0.5mm^[3].

1. 52.9GHz

考虑到测量总存在一定误差,故进行二次逐步回归前,对用(1)式计算的云天亮温引入方差,分别为 0, 0.5, 1K 的正态分布随机数.云对于 52.9GHz 的亮温影响非常大,在云天修正云层影响是有必要的.订正后的晴空亮温 $T'_b(\theta, 52.9)$ 为

$$T'_b(\theta, 52.9) = f_{52.9}(T_b(\theta, 54.5), T_b(\theta, 52.9), T_b(\theta, 35), T_b(\theta, 22)). \quad (3)$$

用(3)式修正云层影响效果很好.图 1 给出修正量 $\Delta B = T_b - T'_b$ 和云中液态水量 L 的关系(它是在误差为 1K 条件下的).云层对于 52.9GHz 亮温的影响随云中液态水量 L 的增大而增大.当云中液态水重 $L < 0.025\text{mm}$ 时, $\Delta B < 1\text{K}$, 此时不需要云层影响的修正.

2. 54.5GHz

处理步骤同上.当云中液态水量 $L < 0.3\text{mm}$ 时,云层对 54.5GHz 的影响 ($< 1\text{K}$),不需要修正.这说明当 54.5GHz 辐射计单独使用时,即使云天,通常也能很好发挥作用.

二、利用 8mm(35.3GHz) 和 1.35cm(22.235GHz) 双频遥感

大气水汽总量云中液态水量

利用微波水汽吸收波段 (22.235GHz) 及微波大气窗区波段 (35.3GHz) 可连续遥感大

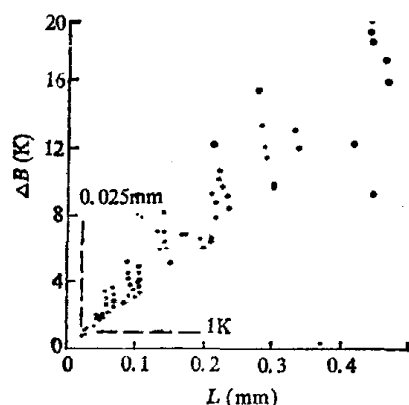


图1 云层对亮温影响 ΔB 和云中液态水量 L

($\nu = 52.9\text{GHz}$, $\theta = 0^\circ$, $\Delta B = T_B - T_{B_0}$,

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sum \Delta B_i^2}{n}} = 7.7\text{K}, n = 90)$$

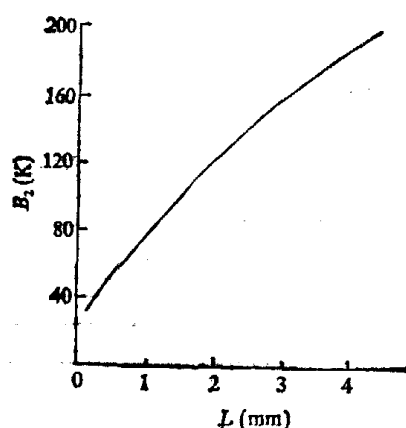


图2 大云水量时, 8mm 天顶方向亮温 B_2 和云中液态水量 L 的关系

气水汽总量 V 及云中液态水量 L 。Guiraud 等^[14,15]指出用 20—30GHz 微波辐射计遥感大气所得的大气水汽总量, 优于无线电探空仪测量的结果。Hogg 等用双频 (20.6GHz, 31.6GHz) 微波辐射计测量云中液态水量和用卫星讯号衰减法测得的云中液态水量比较, 得到满意的结果^[16,17]。用上节中云天气候资料, 云中含水量取为 0.04, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 2g/m³, 这时得到 180 份样本, 云中液态水量为 0.02—4mm。由 (1) 式计算出 8mm(35.3GHz), 1.35cm(22.235GHz) 两频段在天顶方向的辐射亮温, 然后建立其同大气水汽总量 V 及云中液态水量 L 的统计关系。由于云中液态水量的变化范围大, 而在不同范围内, 非线性项的影响不同, 为了使拟合时偏差最小, 提高反演精度, 分成云中液态水量大小两组讨论。

例如北京地区, 5—6 月份为

第一组 L : 0.02—0.1mm

$$V = 0.2412 + 0.05353B_1 - 0.02888B_2 + 1.6228 \times 10^{-4}B_1^2 \quad \text{cm}, \quad (4)$$

$$\gamma = 0.99, \quad s = 0.13\text{cm};$$

$$L = -0.1329 - 5.1948 \times 10^{-4}B_1 + 0.0146B_2 + 3.8928 \times 10^{-5}B_1B_2 \quad \text{mm}, \quad (5)$$

$$\gamma = 0.99, \quad s = 0.025\text{mm};$$

第二组 L : 0.1—4mm

$$V = -1.003 + 0.0808B_1 - 0.0216B_2 - 7.027 \times 10^{-5}B_1^2 \quad \text{cm}, \quad (6)$$

$$\gamma = 0.98, \quad s = 0.19\text{cm};$$

$$L = -0.3587 + 0.01233B_2 + 5.6578 \times 10^{-5}B_2^2 \quad \text{mm}, \quad (7)$$

$$\gamma = 0.98, \quad s = 0.23\text{mm};$$

其中 B_1 为 1.35cm 波段的的天顶亮温 (K), B_2 为 8mm 波段的的天顶亮温 (K), γ 为拟合方程的相关系数, s 为拟合方程的均方根偏差。在云中液态水量 L 较大时, 水汽变化影响已小于反演误差, 二次逐步回归中, 自动剔除和 B_1 有关的因子, L 和 B_2 的关系曲线, 见图 2。

三、晴天大气温度反演问题

云天大气温度廓线的反演,在剔除云层影响后归结为晴空大气温度廓线反演问题。由历史探空资料,用逐步回归方法,可建立不同高度的温度和不同角度上亮度温度、地面温度、湿度、气压的统计关系。

$$T_i = f_i(T_0, q_0, p_0, T_s(\theta_i, \nu_1), T_s(\theta_i, \nu_2) \dots), \quad (8)$$

其中 f_i 为一次式,用逐步回归选取因子, ν_1, ν_2 分别为 52.9GHz 和 54.5GHz, θ_i 为天顶角, $i = 1, \dots, n$ 。在统计时,晴天和云天得到的 $T_s(\theta_i, \nu_1), T_s(\theta_i, \nu_2)$ 噪音分别为 0.5K 和 1K。如果亮度温度噪音为 0.1K 时,高架逆温可以反演得到,在亮度温度噪音为 0.5K 和 1K 的回归方程中不能反映。以北京 6 月份早晨 90 个样本为例,用微波遥感 $\lambda = 5\text{mm}$ ($\nu = 52.9\text{GHz}$) 大气温度廓线为例,在作逐步回归以前,对(1)式计算亮温分别加入标准差 σ_1 为 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0K 的正态分布随机误差,其反演误差,有如图 3 中所示。在统计回归方程中,我们发现: (a) 不同高度上温度和不同角度亮温相关; (b) 被选入自变量因子随 σ_1 增大而减少。云天大气温度反演和晴天大气温度反演分别用不同 σ_1 下的回归方程(如云天用 $\sigma_1 = 1\text{K}$ 的正态分布误差放入(1)式计算亮温,晴天用 $\sigma_1 = 0.5\text{K}$)。图 4 是引入 $\sigma_1 = 0.1\text{K}$ 进行反演的示例,反演大气温度廓线与探空比较,这里用(1)式计算亮温为观测值。

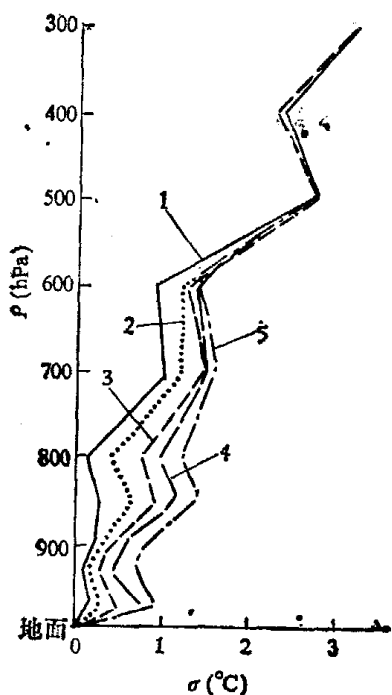


图 3 不同亮温测量误差下,反演总误差随高度的变化

(北京 6 月 52.9GHz 扫角观测,
1— $\sigma_1 = 0$, 2— $\sigma_1 = 0.1$, 3— $\sigma_1 = 0.3$,
4— $\sigma_1 = 0.5$, 5— $\sigma_1 = 1.0$)

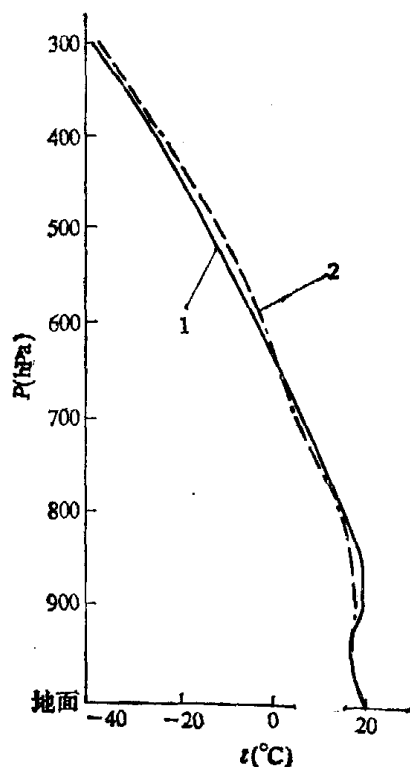


图 4 反演温度廓线与探空比较
(1—探空, 2—反演;

北京 1985 年 6 月 7 日 0700, 以 (1) 式计算
亮温为观测值, $\sigma_1 = 0.1\text{K}$, $\nu = 52.9\text{GHz}$,
扫角观测, 统计反演)

四、观测仪器和实验

微波辐射计是由北京大学与大华无线电厂协作制成新型微波辐射计系列。它的性能指标见表 1。

表 1 微波辐射计系列性能指标

波长 (cm)	0.5		0.8	1.35	3.2
频率 (GHz)	54.5	52.9	35.3	22.235	9.37
整机噪声 (dB)	11	10	9	7	7
分辨率 (K)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
稳定性 (K)	0.6	0.6	0.6	0.6	1
天线波束宽度 (°)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
标定均方根差 (K)	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6

通过 5mm—1.35cm 波段 4 个频率微波辐射计扫角测量, 大气亮温反演大气温度、湿度及通过 35.3GHz, 22.235GHz 两合微波辐射计连续测天顶方向亮温, 连续遥感大气水汽总量和云中液态水量。

五、观测结果及分析

以 1985 年 5—6 月份北京地区观测为例, 这次共取得和探空同时的 4 频率微波辐射计联

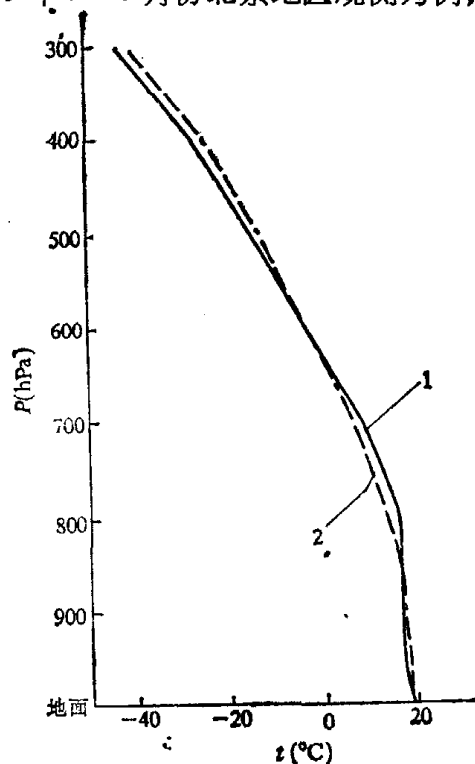


图 5 微波遥感晴天大气温度廓线
(北京 1985 年 5 月 24 日 0700, $\nu = 52.9\text{GHz}$,
扫角观测。1——探空, 2——遥感)

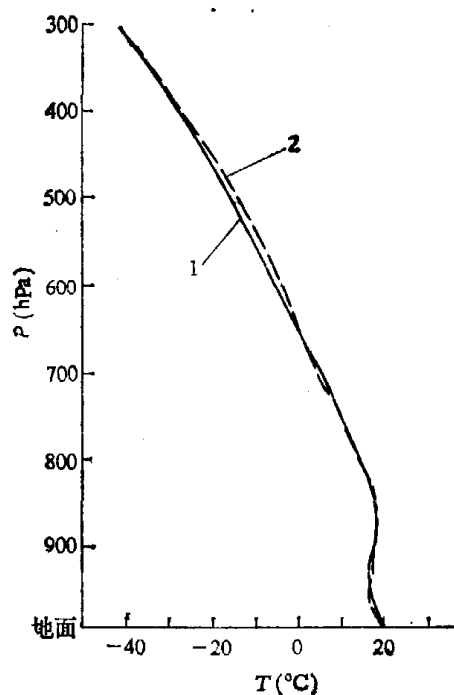


图 6 微波遥感晴天大气温度廓线
(北京 1985 年 6 月 7 日 0700, $\nu = 52.9\text{GHz}$,
 54.5GHz , 扫角观测。其它说明同图 5)

合观测资料 44 份,其中 22 份天上可见云,另外还得到了许多雨前、雨后及晴天的 22.235GHz, 35.3GHz 双频段对天顶连续观测资料。

1. 微波遥感大气温度廓线

(1) 晴天 用 5mm(52.9GHz)微波辐射计扫角观测大气亮温,并观测地面温、湿、压要素,用 $\sigma_1=0.5K$ 的逐步回归反演大气温度廓线,其结果与探空比较,示例如图 5。若用 52.9GHz 微波辐射计单频扫角得到亮温利用逐步反演所得温度廓线为初值,再用 54.5GHz 微波辐射计单频扫角亮温在 700hPa 以下用迭代法反演大气温度,其结果普遍有所改进,示例如图 6。

(2) 云天 在 22 份有云资料中,有少数云中液态水量 $L > 0.025mm$,它们是需要云层影响修正。图 7 和图 8 分别给出 52.9GHz 微波辐射计观测亮温,用(3)式订正后的晴空亮温及用当时探空由(1)式算出亮温的比较,以及用 52.9GHz, $\sigma_1 = 1K$ 条件下的回归方程反演的大气温度结果和探空的比较。从图中可见云层影响修正及云天大气温度遥感结果是好的。在云天,但云中液态水量 $L < 0.025mm$ 时可无需云层影响订正。用上述回归方程反演,其效果很好,无一例外。以 52.9GHz 微波辐射计扫角观测,8mm 和 1.35cm 两波段修正云层影响,用统计法反演大气温度廓线。在全天候(不包括雨天,44 份)的结果和探空比较,见表 2。同样可以给出,全天候(不包括雨天)下,微波遥感等压面高度水平,见图 9。

2. 微波遥感大气水汽总量及云中含水量

晴天大气水汽总量是通过它同 22.235GHz 天顶亮温及地面温、湿、压要素的线性统计关系得到的。云天是利用 35.3GHz 和 22.235GHz 两频率天顶亮温及(4)~(7)式得到的,大气水汽总量见图 10。它与探空结果相比,晴天 ($n = 22$),均方根偏差为 0.12cm,相对偏差为 5.7%;云天 ($n = 22$),相对偏差为 7.6%;全天候 ($n = 44$),均方根偏差为 0.17cm,相对偏差

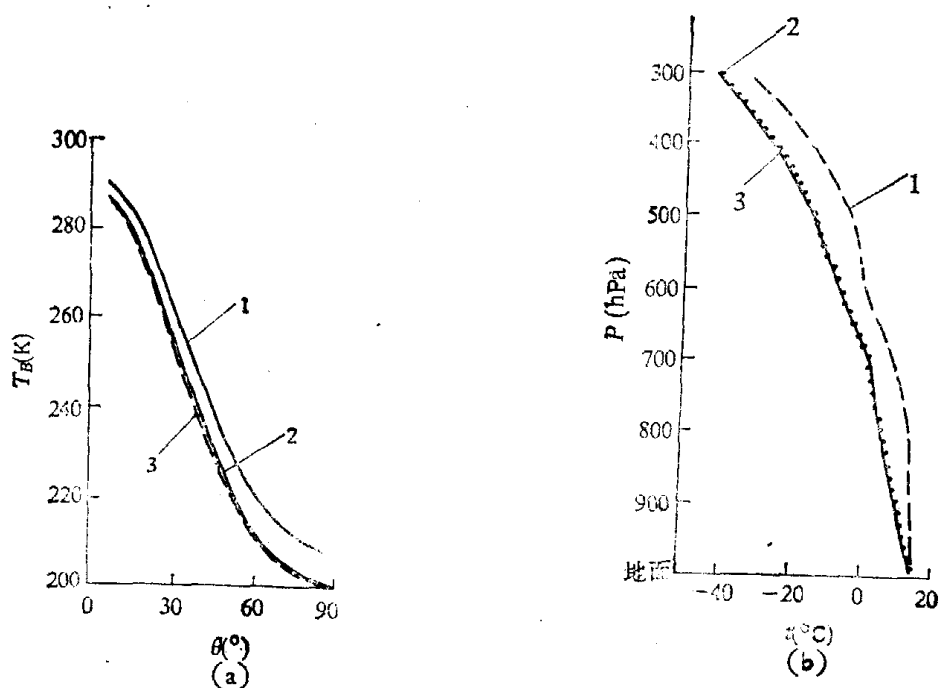


图 7 微波遥感云天大气温度廓线

(北京 1985 年 5 月 30 日 1300, $\nu = 52.9GHz$, 扫角观测。统计反演; $L = 0.086mm$, $V = 2.93cm$ (由 8mm, 1.35cm 微波辐射计测到)。 (a) 图说明: 1——观测亮温, 2——云层修正后亮温, 3——用探空由(1)式算出亮温; (b) 图说明: 1——遥感(用观测亮温未作云订正), 2——遥感(同 1), 3——探空)

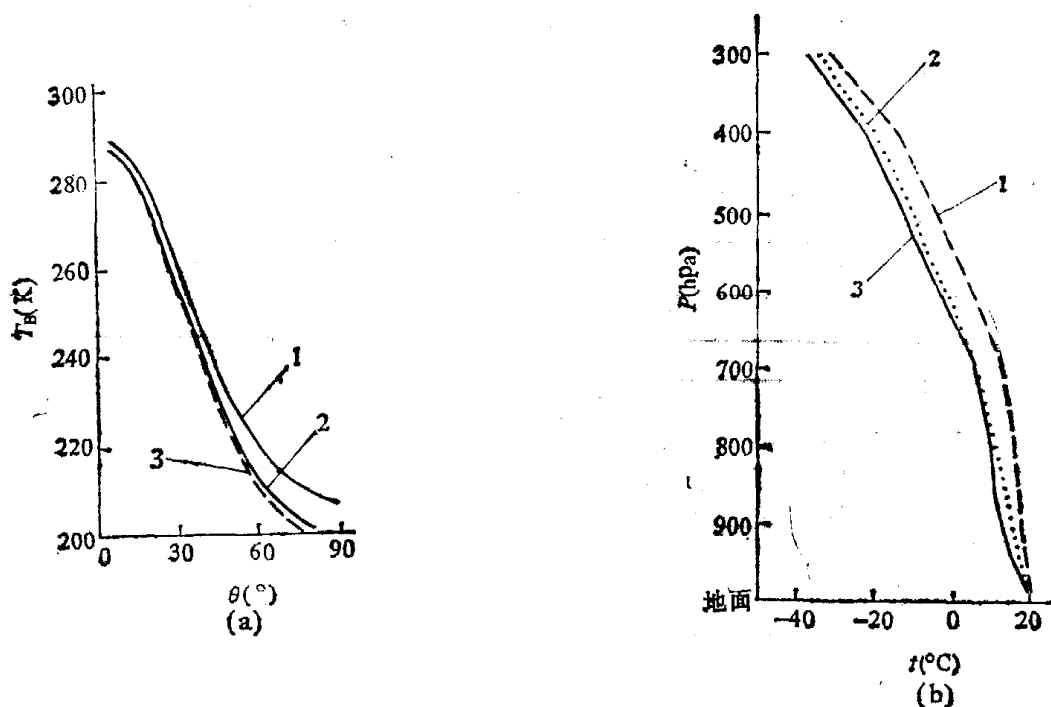


图8 微波遥感云天大气温度廓线

(北京1985年5月30日0700, $\nu = 52.9\text{GHz}$, 扫角观测, 统计反演; $L = 0.123\text{mm}$, $V = 3.16\text{cm}$
(由 8mm , 1.35cm 微波辐射计测到). (a)图说明同图7(a), (b)图说明同图7(b))

表2 全天候(不包括雨天)微波遥感大气温度廓线与探空结果比较

气压 (hPa)	970	930	900	850	800	700	600	500	400	300
方差(°C)	1.3	1.4	1.8	2.2	2.0	2.3	2.4	2.8	2.8	4.0

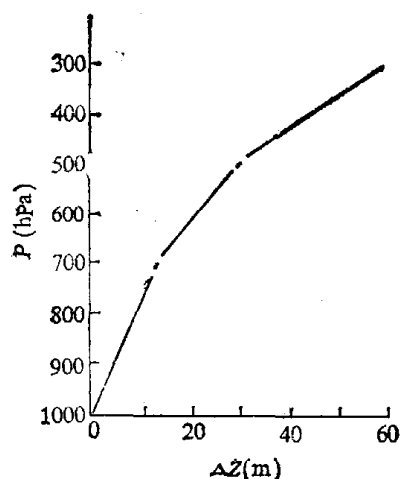
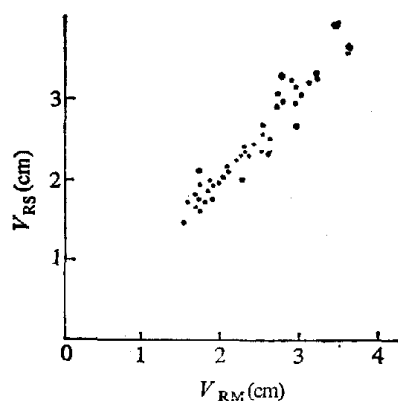


图9 微波遥感等压面高度与探空的偏差

(全天候, 不包括雨天, $n = 44$)

图10 微波遥感大气水汽总量 V_{RM} 与探空大气水汽总量 V_{RS} 的比较

(北京1985年5月23日—6月10日全天候, 不包括雨天; $n = 44$, 相对偏差 $= 6.9\%$, $\text{rms} = 0.17\text{cm}$)

为 6.9% 。

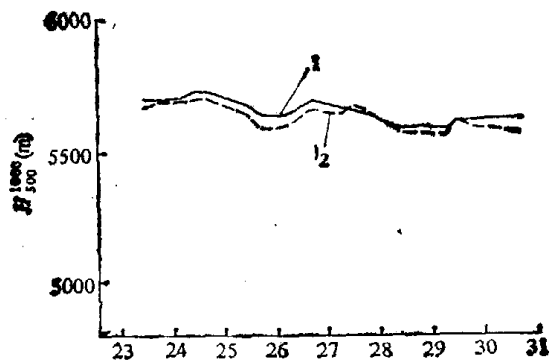
3. 微波遥感天气过程

(1) 气团变化 选用指标: 第一, 1000hPa 至 500hPa 之间厚度 H_{500}^{1000} , 它和两个等压面

间的平均虚温成正比;第二,大气水汽总量 V 及云中液态水量 L 。它们反映气团性质如图 11. 与探空结果是一致的。



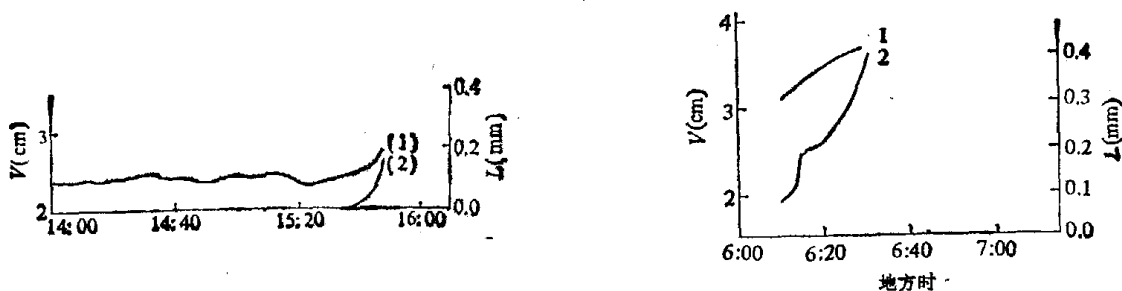
(a) 大气水汽总量 V 和云中液态水量 L 的变化



(b) 1000 与 500hPa 间厚度 H_{500}^{1000} 的变化

图 11 微波遥感监测气团变化(全天候)

(1——探空, 2——遥感)



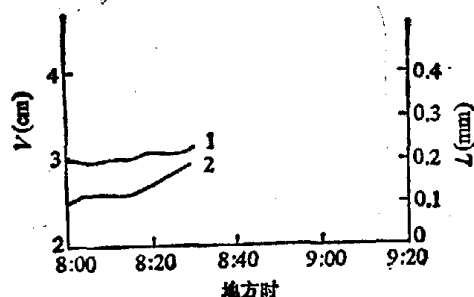
(a) 北京 1985 年 6 月 9 日 15:47 开始下雨

(b) 北京 1985 年 5 月 25 日 6:30 开始下雨

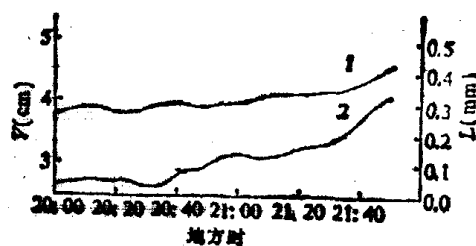
图 12 微波遥感监测积云降雨过程

(1——大气水汽总量 V , 2——云中液态水量 L)

(2) 降雨前后过程分析 1985 年 5—6 月北京地区多次观测到降水前后连续变化资料。图 12 是积云降水前的变化。在积云出现前,大气水汽总量 V 有明显的扰动。从积云出现到降水仅 10—20 min,在此期间,大气水汽总量及云中液态水量迅速增加,直至降雨。图 12(a)是积云在西山发展起来移至本站,西南风最大达 9m/s。图 12(b)是本站附近发展起来积云,导致降雨的。



(a) 北京1985年5月30日8:30开始下雨



(b) 北京1985年5月27日21:30下雨

图13 微波遥感监测层云降雨过程

(说明同图12)

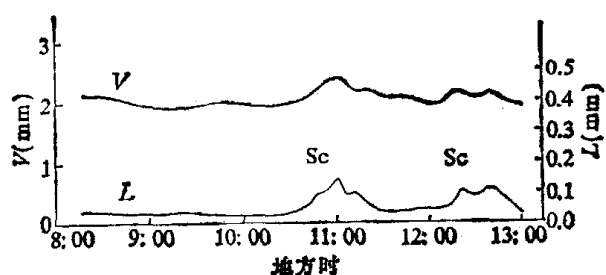


图14 微波遥感监测降雨后云层消散过程

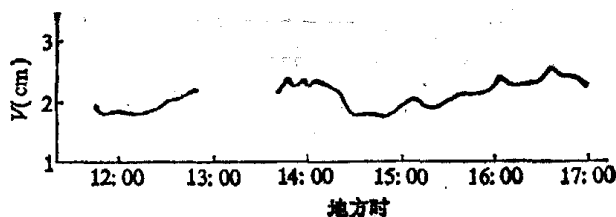


图15 微波遥感监测小尺度扰动中大气水汽总量V的变化

(北京1985年6月10日,晴空)

图13是层状云降雨前大气水汽总量 V 及云中液态水量 L 的变化。从图13中可见,在层状云降水前, V 及 L 均随时间增大,但比积云降雨要平缓得多。图14是降水后云层消散过程中大气水汽总量 V 及云中液态水量 L 的变化。

(3) 小尺度扰动 当远方(如北京西山)积云发展时,本站晴空大气水汽总量有强烈的振动,如图15中所示。在此期间 V 的最大差值达0.8cm,此时在西边有发展旺盛的积云群。在稳定天气下,大气水汽总量的日变化量小于0.3cm。稳定天气和扰动天气水汽总量变化有明显的差异。

六、结 论

1. 5mm微波辐射计配合8mm和1.35cm微波辐射计可遥感云天大气温度层结。使微波遥感大气温度廓线可在全天候(不包括雨天)下进行。微波遥感等压面高度,与探空结果比较,在500hPa以下,偏差小于28m。可满足一般天气分析要求。

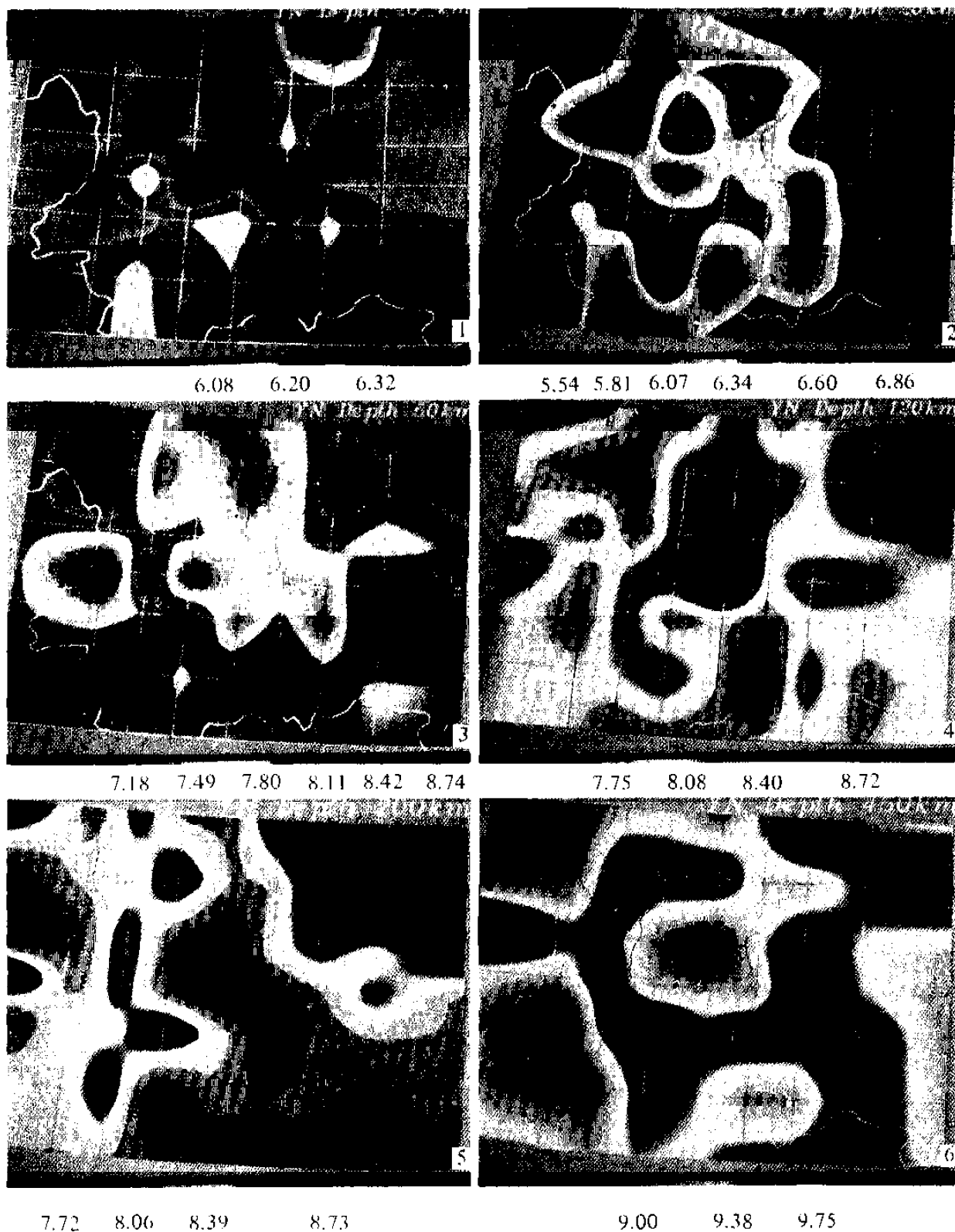
2. 微波遥感大气湿度及云中液态水量,结果是好的,在全天候(不包括雨天),大气水汽总量与探空比较,偏差为6.9%。

3. 微波遥感能连续监测天气变化,如气团变化(包括平均虚温、大气水汽总量及云中液态水量),云雨过程和小尺度扰动等。

参 考 文 献

- [1] Hogg, D. C. et al., J. Climate Appl. Meteorol., 22(1983), 801—831.

- [2] Hosler, C. R. et al., *J. Appl. Meteorol.*, **11**(1972), 341—348.
- [3] Snider, J. B. & Rotter, D., *ibid.*, **21**(1982), 1286—1291.
- [4] Hogg, D. C. et al., *J. Climate Appl. Meteorol.*, **22**(1983), 789—806.
- [5] Westwater, E. R., *J. Appl. Meteorol.*, **14**(1975), 524—539.
- [6] 赵柏林等, *大气科学*, **2**(1978), 323—331.
- [7] 赵柏林等, *中国科学*, **1980**, **9**: 874—882.
- [8] 赵柏林等, *中国科学 B 辑*, **1984**, **11**: 1059—1066.
- [9] 薛永康等, *中国科学 B 辑*, **1984**, **11**: 1367—1375.
- [10] 魏重等, *大气科学*, **13**(1989), 101—107.
- [11] 黄润恒等, *大气科学*, **11**(1987), **4**.
- [12] 赵柏林等, *北京大学学报(自然科学)*, **1987**, **4**: 26—36.
- [13] 顾展潮, *云与降水物理学基础*, 科学出版社, 1980.
- [14] Боровиков, А. Н. и др., *Физика Облаков*, Гидромет. Изд., 1961.
- [15] Guiraud, F. O. et al., *IEEE Trans. Geosci. Electr.*, **GE-17**(1979), 129—136.
- [16] Snider, J. B. et al., *J. Appl. Meteorol.*, **19**(1980), 577—579.
- [17] Heggli, M. et al., *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **4**(1987), 204—213.



1. 研究区上地壳 (0-20km) 的速度图象, 2. 研究区中地壳 (20-50km) 的速度图象, 3. 研究区上地幔顶部 (50-85km) 的速度图象, 4. 研究区120km 深的速度图象, 5. 研究区200km 深的速度图象, 6. 研究区450km 深的速度图象。