

用1.35厘米波长地面微波辐射计探测 大气中水汽总量及分布

魏重 薛永康 朱晓明 邹寿祥*

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

用1.35厘米波长地面微波辐射计进行了全年四个季节的观测。采用蒙特卡洛法对资料进行了反演。七十多份资料的统计结果表明:水汽总量的相对误差为5.3%,低层水汽廓线(750毫巴以下)的相对误差在20%以下。对水汽总量及廓线随时间的演变与天气背景的关系亦作了初步分析。

一、前 言

在过去二十年中,人们在微波遥感大气水汽总量方面做了大量的工作,在空对地和地对空遥感两个方面都得到了比较好的探测结果^[1]。六十年代末,国外开始进行遥感大气水汽分布的探索。七十年代以来,美国在“雨云-5号”气象卫星上装置水汽通道,做水汽测量的实验。与此同时,用类似的装置在地面进行测量对流层水汽分布的实验^[2]。此后,Hogg等^[3](1980)在用微波波谱仪测温的同时,利用1.35和0.8厘米两个波段的地面测值,根据统计反演的方法,得到了测水汽总量的统计结果和一些水汽廓线的反演个例。我国北京大学赵柏林等^[4]也曾用迭代反演的方法,对1.35厘米辐射计的扫描探测值进行反演,给出了9次廓线的平均结果和个例。所有这些工作都表明微波遥感水汽廓线的可能性,但要进一步说明所用方法及仪器探测水汽廓线的能力和精度,资料的统计代表性尚感不足。

近年来,我们在用统计模拟法(蒙特卡洛法)反演水汽分布方面做了一些理论探讨和数值实验。薛永康等^[5,6]的工作表明,该方法在提高反演精度和对逆湿及某些精细结构的反映能力等方面都具有一定的特色。在此基础上,我们用自行研制的1.35厘米波长地面微波辐射计,于1982年1,4,7,8,10等月份在北京北郊进行了观测,每次观测10天左右,从而取得了有四季代表性的较系统的晴空水汽资料和某些天气背景下水汽场随时间的演变资料。所得资料都用蒙特卡洛法进行了反演。本文给出所测水汽总量和廓线精度的统计结果和某些个例,并对反演方法中的有关问题做了讨论和说明。同时,对水汽场的演变与天气背景的关系作了粗浅的分析。

1983年5月20日收到,1983年8月24日收到修改稿。

* 参加观测和资料处理的还有于明、马长旺、忻妙新、陈英、王秀英、范玲刚等同志。

二、仪器和标定

观测所用仪器是一台脉冲噪声注入 Dicke 式零平衡微波辐射计, 其结构框图见图 1, 主要技术指标见表 1。关于仪器的详细技术细节可参见文献 [7]。仪器的记录值通过冷负载终端(液氮)作绝对标定或自然观测进行标定。我们反演所用的亮度温度都是根据自然标定得到的。在必要时用绝对标定来考查和监视仪器的稳定性。

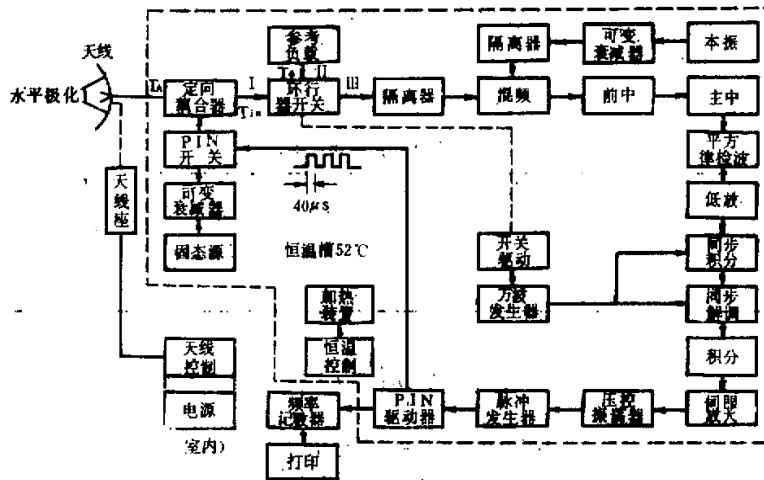


图 1 仪器结构框图

表 1 仪器主要技术指标

频率	22.235GHz±200MHz
天线	直径 1.5 米 卡塞格伦式 增益 $G \geq 35\text{dB}$ 主瓣束宽 0.6 度 副瓣电平 $< -20\text{dB}$
馈源	锥形喇叭
整机噪声系数	9.4dB
积分时间	3.6 秒
分辨率	$\Delta T_{\min} = 0.3\text{K}$

我们在用微波辐射计作观测时用了从仰角 1° 到天顶共 16 个角度。在选取标定样本的仰角时, 我们用 4 月份资料, 取三种不同仰角范围的样本进行标定试验。结果发现标定效果与所选样本组的仰角范围有关, 样本集合选在较高仰角时标定效果较好。这主要是由于高仰角探测时仪器接收值的误差比低仰角探测时要小许多的缘故。但是, 另一方面, 在进行水汽廓线反演时又要尽可能利用低仰角的信息, 因而要求标定样本要具有较低

仰角的代表性。考虑到这些因素,我们选取 10, 12, 15, 18, 20, 25, 30, 40, 60 和 90 为标定所用的角度。

在作自然标定时,我们用多元回归法对标定样本进行拟合。公式为

$$\hat{T}_b(\theta_i) = \sum_j c_{ij} f(\theta_j) \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

其中 θ 是仰角, f 是仪器观测记录, $\hat{T}_b(\theta)$ 是通过标定得到的亮温, c_{ij} 是事先对标定样本拟合得到的系数矩阵的元素。对 4 月到 10 月的 07 时, 13 时, 19 时的 70 多份资料用此法进行标定, 将标定结果与用北京气象台的当时的探空资料计算得到的亮温进行比较, 其平均误差见表 2。

表 2 自然标定平均误差

时间	1 月	4 月	7 月	8 月	10 月	平均
误差(°C)	1.28	1.62	1.90	3.65	3.66	2.89
样本数	5	17	15	22	18	77

三、反演方法

关于反演方法已在论文^[5,6]中有详细而系统的介绍。这里只对影响处理资料精度的一些问题作一简要说明, 其中包括地面约束条件, 初值给予方式以及观测角度的选取等方面的问题。

在晴空大气中水汽的遥感方程是

$$T_b = \int_0^\infty e^{-\int_0^X k_a dx} k_a T \sec\theta dX \quad (2)$$

由于方程的核函数与水汽分布密切相关, 因此这是一个非线性 Fredholm 积分方程。Rodgers 指出^[6], 即使在线性情况下, 这一类方程的解也不是唯一的, 必须加入某些约束条件。我们在用正交化方法考察水汽 22.2 千兆赫吸收线附近通道的相关性时, 发现独立通道的数量是相当有限的, 仅依靠这些信息来反演水汽廓线是不够的, 必须补充新的信息。

在地对空遥感时, 由于地面气象条件已知, 而水汽又集中在近地面层, 从而提供了很有利的条件。我们在用蒙特卡洛法^[6]处理观测资料时, 始终将地面水汽作为地面随机取样区间的中心。此外, 我们在求水汽初值时, 利用探空历史资料逐月分不同时刻建立温度和湿度之间的回归矩阵。这样, 可以用已知的温度廓线求得一条水汽廓线。在这个过程中, 考虑到上下层水汽之间有较强的相关性, 所以利用地面水汽已知这一条件, 把地面水汽值与温度向量结合在一起组成一个“因子”向量来预报水汽初值, 从而提高初值精度。如对北京 7 月 19 时探空资料, 不利用地面值时, 回归值相对湿度的均方差是 0.131, 利用地面水汽值后则为 0.115。

由于目前历史探空资料从 1000 到 150 毫巴仅能提供 8 个高度上的探空值。为了实

用需要,我们利用晴空条件下水汽近似指数递减的特点,在求得8层的水汽值后,对其它各层进行指数拟合,从而提供了从地面到200毫巴处共13层的水汽初值。然后我们再用辐射亮度温度值对这条初值曲线进行订正。

在数值试验中^[6],我们仅利用二个角度的观测值,并采用

$$\max_{i=1,2} |\tilde{T}_{bi} - T_{bi}| \leq \delta \quad (3)$$

作为判据。其中 $\tilde{T}_{bi}$ 为由反演计算的亮温, T_{bi} 为观测亮温。在实际观测中,由于仪器的精度,观测的实际误差等因素,在作亮度温度标定时,发现在每一个固定仰角上,常有某些个例误差较大。为了克服这种随机误差,我们采用7个角度,它们是 15° , 18° , 20° , 25° , 30° , 40° 和 60° 。用

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 (\tilde{T}_{bi} - T_{bi})^2}{7}} < \delta \quad (4)$$

(在计算中 δ 取 3K) 作判据来进行廓线求解,从而提高了精度。

四、观测结果

在1982年1,4,7,8,10这几个月份中每月持续七至十天进行观测。所取资料分为两类,一类是在北京气象台探空施放的同时(07时,13时,19时)所取的称之为对比资料。另一类是每间隔1—2小时所取的,称之为演变资料。共取得晴空对比资料七十多份。演变资料则只是在夏季七、八月中某些天气背景下取得的。每次观测同时用通风干湿表测量地面湿温。每次资料均用蒙特卡洛法进行反演。反演结果分析如下。

1. 晴空水汽总量及其随时间的演变

大气积分水汽总量不仅与气象和天气预报有关,而且也与微波射电天文学和长距离无线电通讯等多方面的工作有关,因此,它的测量有着较大的实用意义。与统计回归的方法^[3]或某些利用经验关系来求水汽总量^[4]的方法不同,我们不是直接建立水汽总量与探测亮温的关系,而是根据蒙特卡洛法反演的水汽廓线对高度积分来得到整层大气的水汽总量。图2给出了得到的水汽总量与探空求得水汽总量的对比结果。由图可见,水汽总量变化范围在0.26—5.35克/厘米²之间,它基本上覆盖了北京地区从最干燥的冬季到潮湿的夏季的水汽变化范围。反演结果见表3。水汽总量的探测值和反演值的相关系数为0.99。考虑到探空系统在测湿方面的相对误差平均在3—10%*这一情况,可以认为所得

表3 水汽总量的反演误差

时 间	1月	4月	7月	8月	10月	平均
总均方根误差 (克/厘米 ²)	0.048	0.059	0.120	0.196	0.073	0.112
相对误差(%)	6.0	9.3	3.5	5.5	2.4	5.3

* 梁奇先,中美业务用“59—701”和“VIZ 1292—CMD”高空系统对比,1982年中国气象学会学术年会论文。

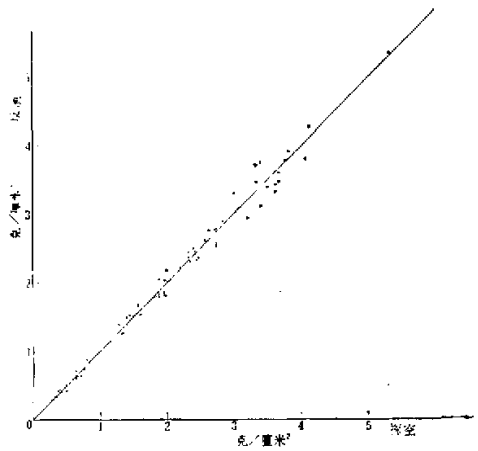


图2 反演水汽总量与探空的比较

●——1982年1月, ×——1982年4月, ▲——1982年7月,
□——1982年8月, ○——1982年10月

结果精度是令人满意的。四月份由于比较干燥, 尽管相对误差比较大, 其均方根差却很小。

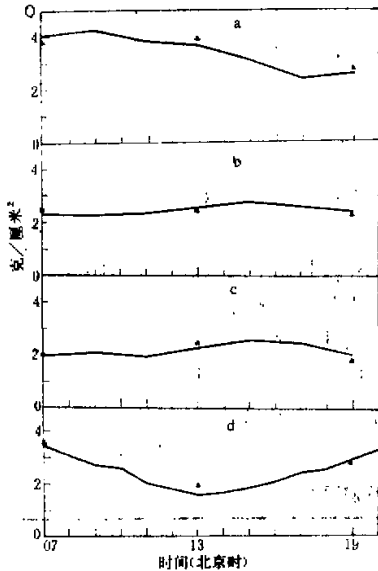


图3 水汽总量随时间的演变个例

(a) 1982年7月13日, (b) 1982年7月15日,
(c) 1982年7月16日, (d) 1982年8月18日。

图3给出了四个晴空水汽总量随时间演变的例子。图中曲线为辐射计测量结果, 三角标记为探空的水汽总量。这四天从本站地面宏观观测来看都是较好的晴空, 但是地面天气图反映出它们的天气背景并不相同: 7月13日早上8时有一冷锋临近本站; 7月15日本站全天为高压控制; 7月16日本站处于高、低压之间, 基本受高压控制; 8月18日上午为冷锋后西北气流控制, 14时有一冷锋从西北偏北方向移向本站, 17时逐渐接近本站。从图3可以看到不同天气背景下水汽总量的演变情况是有区别的。冷锋后水汽总量有下降的趋势, 冷锋前水汽总量有上升的趋势, 在高压控制下的两天中水汽总量变化平稳, 午后呈现稍有增加的日变化趋势。有限的个例分析给我们一定的启示: 在掌握更多的资料基础上, 有可能得到辐射计所测水汽总量的变化与天气背景关系的一定模式, 从而得到有预报意义的水汽总量演变的特性。

图3d还表明, 晴空条件下一天中水汽总量的变化幅度可能会是相当大的。

2. 晴空水汽廓线及其随时间的演变

我们将1月到10月的77份样本不同高度上的反演结果分月列入表4。由表4可见, 750毫巴以下高度上的反演相对误差一般在20%以下, 700毫巴到200毫巴之间的反演相对误差在30%到50%之间。与表5中所列比湿初值的均方根差相比, 比湿的均方根差在850毫巴到600毫巴之间减少了30%左右, 500毫巴到400毫巴减少20%以上, 到300毫巴以上则减少甚微。这与数值试验的结论是基本吻合的, 说明蒙特卡洛法反演水汽分布较之用温度探空资料来回归水汽分布精度有明显的提高。个别层次上相对误差较大, 与水汽值较少有关。

表4 反演水汽廓线误差统计

	月份	样本数	1000	950	900	850	800	750	700	650	600	500	400	300	200
相对误差 (%)	1	5	3.9	13.4	11.6	10.6	8.8	10.8	12.8	10.8	26.0	27.6	15.5	27.1	173
	4	17	10.8	25.8	26.1	31.4	15.7	16.1	18.3	23.7	46.6	54.6	25.1	46.7	75.6
	7	15	4.6	12.5	19.7	23.2	12.7	12.8	14.3	25.5	29.4	30.0	32.6	34.1	25.6
	8	22	3.1	14.4	16.4	14.4	12.5	16.8	28.9	39.6	59.8	57.2	43.6	39.0	35.5
	10	18	5.0	14.6	15.5	22.3	32.2	36.0	66.0	27.3	23.7	42.3	27.0	55.0	21.0
	平均	77	5.6	16.5	18.6	21.3	17.5	19.8	31.1	28.0	40.1	46.7	31.0	43.0	49.6
均方根差 (克/千克)	1	5	0.100	0.343	0.225	0.179	0.123	0.151	0.119	0.126	0.220	0.087	0.020	0	0.014
	4	17	0.334	0.664	0.635	0.465	0.218	0.159	0.200	0.216	0.23	0.133	0.052	0.014	0.009
	7	15	0.571	1.13	1.98	1.55	0.81	0.66	0.71	1.00	0.74	0.40	0.177	0.070	0.09
	8	22	0.426	1.93	1.94	1.41	1.00	1.17	1.088	1.115	1.220	0.695	0.468	0.167	0.033
	10	18	0.60	1.32	1.06	1.133	0.87	0.74	0.93	0.48	0.599	0.236	0.087	0.043	0.005
	平均	77	0.449	1.24	1.33	1.07	0.696	0.67	0.71	0.67	0.69	0.363	0.199	0.074	0.031

表5 初值均方误差统计(克/千克)

月份	样本数	850	700	600	500	400	300	200
1	5	0.504	0.424	0.093	0.062	0.023	0.007	0.033
4	17	0.95	0.42	0.31	0.16	0.074	0.014	0.01
7	15	1.43	1.34	1.095	0.64	0.24	0.076	0.04
8	22	2.07	1.76	1.64	0.84	0.58	0.18	0.08
10	18	1.43	1.105	1.18	0.24	0.109	0.039	0.004
平均	77	1.45	1.14	1.03	0.46	0.26	0.079	0.036

由于在反演中所用标准层上探空资料层次的限制, 所给反演初值在近地面的层次比数值试验中要少。700毫巴以下只有地面和850毫巴两层有初值, 这是造成900—850毫巴附近误差较数值试验略为增大的一个原因。此外, 前面我们已看到, 经过自然标定的误差为2.5K左右, 远大于数值试验中的误差判据。在这种情况下, 仍能得到合理精度的反演结果, 是由于蒙特卡洛法是取条件数学期望为方程的解, 它是非线性方程的最小二乘法解^[6], 从而使反演值与真值的误差尽可能减小的缘故。这样使得这个方法有较大的实用性。

为了说明这种方法的反演特色, 我们给出两个反演廓线的个例。一个是冬季雪后(1982年1月4日19点)晴空(图4), 代表反演结果比较好的情况。另一个是春季清晨有

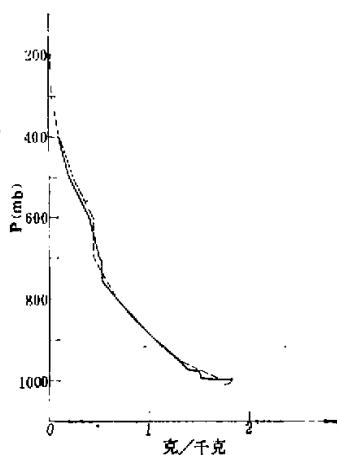


图4 1982年1月4日19点反演水汽廓线个例。实线:探空,虚线:反演

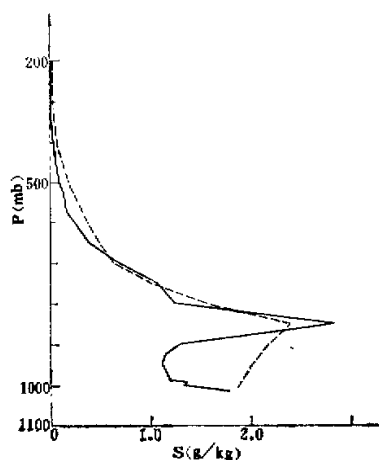


图5 1982年4月16日07点反演逆湿廓线个例。实线:探空,虚线:反演

逆湿的情况(图5)。从图5可以看到,该反演方法有反映逆湿结构的能力,从全部资料统计来看,能正确反映逆湿的个例有12次,约占探空有逆湿个例总数的31%。当然,也应指出虽能反映逆湿的结构,但反演误差却比没有逆湿时要大。实际反演中有逆湿的个例将近占总数的一半。这也是造成某些层次反演误差较大的一个原因。

最后,在图6中给出1982年7月16日水汽廓线随时间演变的一个例子。这天地面基本上受高压影响,高空500毫巴为平直的西北气流。由图可见午后近地面有一厚达1.5公里的逆湿层,随时间而增强,在15时达最大,以后逐渐减弱、消失。这个变化趋势与07时、13时、19时的探空实况是一致的。在探空资料中,13时出现逆湿层,到19时则已消

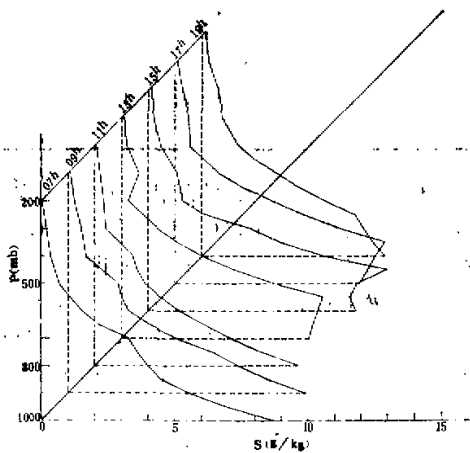


图6 水汽廓线随时间的演变个例(1982年7月16日)

失, 可见用辐射计所得数据所作的水汽廓线反演确实能提供水汽场演变的资料。

五、结 论

(1) 七十份以上的反演结果与探空资料作比较的统计结果表明: 在目前仪器条件下, 蒙特卡洛法在测水汽总量方面的均方根绝对偏差为 0.11 克/厘米^2 , 相对误差为 5.3% 。测水汽廓线方面, 750 毫巴 以下平均误差在 20% 以下, 700 毫巴 以上平均误差在 $30-50\%$ 。该方法对仪器的精度要求不苛刻, 实用性较强, 并具有一定的反映逆湿的能力。

(2) 水汽总量及廓线随时间的演变个例分析表明: 水汽总量演变与天气背景存在着一定的相关关系, 用辐射计遥感水汽廓线随时间的演变也是可能的。预计在地面遥感探测的时间间隔加密以后, 它将有可能用于研究中小尺度天气背景水汽场的演变。

致谢: 工作过程中得到杨培才、刘锦丽、郭裕福等同志的帮助, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 周秀骥等, 大气微波辐射及遥感原理, 第136—137页, 科学出版社, 1982。
- [2] Westwater E. R. et al., Application of statistical inversion to ground-based microwave remote sensing of temperature and water vapor profiles, in "Inversion Methods in Atmospheric Remote Sensing", A. Deepak Ed., p. 395, 1977.
- [3] Hogg D. C. et al., Design of a ground-based remote sensing system using radio wavelengths to profile lower atmospheric winds, temperature and humidity, *Remote sensing of Atmosphere and Ocean*, 1980.
- [4] 赵柏林等, 微波遥感大气湿度层结的研究, 气象学报, 第39卷第2期, 217—225页, 1981。
- [5] 薛永康等, 蒙特卡洛法在微波遥感水汽垂直廓线上的应用, 中国科学, 1981年, 第11期, 第1367—1375页。
- [6] 薛永康等, 地对空微波遥感水汽垂直廓线的方法, 大气科学第2期, pp. 115—124, 1983。
- [7] 赵从龙等, 遥感大气湿度1.35厘米微波辐射计, 中国科学, (待发表)。
- [8] Rodgers, C. D., Retrieval of Atmospheric temperature and Composition from remote measurements of thermal radiation, *Rev. Geophy. and space phys.* Vol. 14, No. 4, pp. 609—624, 1976.

DETERMINATION OF ATMOSPHERIC PRECIPITABLE WATER AND HUMIDITY PROFILES BY A GROUND-BASED 1.35 CM RADIOMETER

Wei Chong Xue Yongkang Zhu Xiaoming Zou Shouxiang

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

In four seasons of 1982 measurements of atmospheric water vapor profiles and total precipitable water were made by a ground-based microwave radiometer operating at 1.35 cm wavelength. All data were processed by using Monte Carlo Method. The statistical results of more than seventy cases show that the relative error compared to the radiosonde observations is 5.3% for the total precipitable water vapor and less than 20% for humidity profiles in the lower atmosphere below 750 mb. In addition, the relationship between the weather background and both the humidity profiles and the total precipitable water vapor were analyzed.