

利用地基遥感方法监测 大气中汽态、液态水含量分布特征的分析*

段 英 吴志会

(河北省人工影响天气办公室, 石家庄 050021)

提 要

文章根据1992~1994年4~6月间利用北京大学研制的新一代双通道共天线地基微波辐射计在河北省石家庄等地的监测资料,分析了晴空、有云无雨两种天气条件下,大气中积分汽态水、液态水含量的分布特征,两种相态大气含水量的相对分布特点。结果表明,在有云无雨的天气条件下,云中液态水积分含量仅占大气中总水量的1%,说明作为人工增雨资源条件的云中液态水含量仅占大气总水量的一小部分。因此,分析认为,以往通常采用大气中水汽含量评估人工增雨资源条件的方法,存在着不确切性。

关键词:地基遥感 汽态水 液态水 分布规律

引 言

众所周知,大气中的水汽在各种时空尺度的大气过程中扮演着重要角色。因此,对大气中汽态、液态水的分布特征及演变规律的研究,一直是大气科学工作者所关心的问题。就国内外广泛开展的冷云人工增雨条件研究而言,从静力催化的角度看,人工催化的过程是促进云中过冷水滴向冰晶转化的过程,从而达到提高云的降水效率、增加降水的目的。因此,在一定程度上可以认为,云中云水含量及过冷水条件是决定可播性的先决条件。显然,如何监测不同天气条件下水汽、液态水的分布特征,研究其转化规律,也是人工增雨科研中的重要课题。

对云中液态水含量的观测,一般采用飞机进入目标云系,利用机载仪器直接测量的办法。如60~70年代,国内广泛采用机载手动含水量仪等云物理取样观测仪器,应用了较长时间。这种仪器,存在着取样速率低、不连续、测量误差大的缺点。70年代中期,美国研制成功了自动连续测量云中不同尺度粒子的机载粒子测量系统(PMS),该仪器采用了光学方法,由于其具有自动连续取样、自动记录、测量精度高等优点,被广泛应用于云的微物理过程及云水分布特征的研究^[1]。但因受飞机性能和天气条件的限制,该系统也无法实现对云系进行连续监测。

80年代初,地基微波遥感技术在国际上开始应用于云物理研究中。1984、1985年,Mark Heggli^[2]利用地基微波辐射计对美国西部内华达山脉冬季风暴云系中的液态水分

* 本文得到中国气象局科学基金和河北省自然科学基金项目(493128)的共同资助。

1997-12-21收到,1998-06-29收到再改稿。

布进行了连续跟踪遥测. 1988 年 Warner^[3]对微波辐射计测量液态水精度进行了研究, 确认了其可行性, 从而为测量大气中的气态、液态水的连续分布开辟了新的途径.

80 年代初, 地基微波遥感技术在我国的研究有显著进展^[4~6], 到 80 年代末, 这一技术已达到初步试用阶段^[7], 为地基微波辐射计应用于人工影响天气外场试验提供了技术条件.

1992~1994 年 4~6 月期间, 河北省应用北京大学研制的新一代双通道共天线地基微波辐射计, 在飞机人工增雨外场工作中进行了系统的观测并获得了初步的研究结果. 1994 年, 胡成达等^[8]报道了有关该仪器的原理及性能, 朱元竞等^[9]介绍了依据探空资料和辐射计亮温反演大气中积分气态水、液态水的方法. 1997 年, 段英等^[10]利用上述资料分析云水资源条件和人工增雨潜力的初步结果. 本文利用上述 3 年微波辐射计外场监测资料, 分析晴空、有云(无雨)两种天气条件下大气中积分气态水含量的月变化特征, 有云大气中液态水分布的统计特征、气态和液态水含量的相对分布特点, 并就有关问题进行了分析和讨论.

1 外场观测与资料收集

微波辐射计观测于 1992~1994 年的 4~6 月间进行, 使用的辐射计被安装在飞机增雨作业及云物理探测飞行的起降机场内, 辐射计固定在一个四周较空旷的平台上.

大气水汽、液水含量的反演按文献^[9]的方法: 选取河北省邢台市 3 年 4~6 月的探空资料, 对每一份资料采用相对湿度阈值法, 确定云层厚度, 并根据本地区云中含水量的观测资料, 把云中含水量分为 12 级, 即 0.01, 0.04, 0.07, 0.10, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.20, 0.23, 0.26, 0.30 g/m³, 模拟计算出两频段的辐射亮温, 同时也计算出大气总水量 V 和云中积分液态水含量 L , 得到大量的样本.

用 T_{B_1} 、 T_{B_2} 分别表示 35.3 GHz 和 22.235 GHz 在 θ 方向上接收到的辐射亮温, 考虑到 T_{B_1} 、 T_{B_2} 和 V 、 L 之间并非是完全线性关系, 在建立统计关系时, 引入了 2 次项和交叉项, 即假定:

$$V = A_0 + A_1 T_{B_1} + A_2 T_{B_2} + A_3 T_{B_1}^2 + A_4 T_{B_2}^2 + A_5 T_{B_1} T_{B_2} + A_6 p + A_7 q + A_8 T$$

$$L = B_0 + B_1 T_{B_1} + B_2 T_{B_2} + B_3 T_{B_1}^2 + B_4 T_{B_2}^2 + B_5 T_{B_1} T_{B_2} + B_6 p + B_7 q + B_8 T$$

其中 p 为地面气压, q 为地面比湿, T 为地面温度.

用大量样本进行逐步回归计算, 得到了不同仰角上的回归系数, 拟合方程的相关系数一般为 0.996~0.998, 相关性非常好.

1992 年观测期间, 由于未对辐射计天线采取措施, 当本场有降水时, 因天线积水使监测数据产生严重误差, 只好停止观测. 1993~1994 年观测期间, 采取了在辐射计天线上方搭一伞式遮盖的办法, 当有降水出现时, 采用 45°仰角观测, 从而实现了对降水云系的积分气态、液态水含量的连续观测. 为了研究降水性云系(层状云)的宏、微观结构、演变过程、作业条件等, 在微波辐射计观测期间, 还利用飞机、雷达、卫星、探空加密进行了同步观测, 并收集了相应的地面降水资料和实时天气资料. 有关观测及资料收集情况分别见表 1、2.

表 1 观测情况统计表

| 微波辐射计 观测时间 | 观测 地点 | 累积观测 时数(h) | 其它观测 项目 |
|---------------|----------|---------------|------------|
| 1992 年 4~6 月 | 故城机场 | 203 | 飞机、雷达、探空等 |
| 1993 年 4~6 月 | 石家庄机场 | 210 | 飞机、雷达、探空等 |
| 1994 年 4~6 月 | 沧州机场 | 321 | 飞机、雷达、探空等 |

表 2 资料收集情况表

| 天气条件 | 资料样本(h) | |
|------|---------|-----|
| | 水汽 | 液态水 |
| 晴空 | 145 | — |
| 有云无雨 | 534 | 534 |

为校对辐射计观测的液态水含量值,1992 年 6 月 21 日在只有低云的情况下,在不同时段,利用微波辐射计和机载 PMS 仪器进行了同步观测,对二者取得的垂直气柱内的累积液态水含量值进行了对比,其比值为 0.427,与 Warner 等(1988)^[3]给出的结果比较相近(见表 3)。

表 3 河北省(a)与国外(b)双频微波辐射计观测液态水含量资料与飞机观测结果对比

| (a)河北省 | | (b)Drake&Warner(1988) ^[11] | |
|---------------------------|------------------------|---------------------------------------|---|
| 微波辐射计观测 L_{rad} (mm) | 飞机观测 L_{air} (mm) | H (m) | $a = \frac{L_{rad}(g \cdot m^{-3})}{L_{air}(g \cdot m^{-3})}$ |
| 0.045 | 0.185 | 900 | 0.5122 |
| 0.045 | 0.066 | 1400 | 0.5726 |
| 0.045 | 0.085 | 1900 | 0.6435 |
| 0.040 | 0.074 | | |

注: $a = L_{rad}/L_{air} = 0.427$

注: $a = 0.5761$

2 大气中汽态和液态水含量的统计特征

2.1 汽态水含量的频率分布

利用 1992~1994 年 4~6 月间,双通道微波辐射计连续监测的资料,分晴空、有云无雨两种天气条件,对汽态水含量随月份的演变特征进行了统计分析,分析结果见图 1 和表 4。

表 4 不同月份不同天气条件下的汽态水含量中值

| 天气条件 | 汽态水含量中值(mm) | | |
|------|-------------|------|------|
| | 4 月 | 5 月 | 6 月 |
| 晴空 | 15.6 | 20.3 | 28.5 |
| 有云无雨 | 20.1 | 28.2 | 37.9 |

结合图 1 和表 4 分析可以看出,就汽态水(V)含量中值而言,在晴空、有云无雨两种条件下,在 4 至 6 月期间均呈逐月递增的趋势,在相同天气条件下,随月份的增长,中值一般增加 30%~40%;在相同月份中,按晴空、有云无雨两种天气条件的改变,积分汽态水含量的中值也递增 30%~40%。分析认为,从 4~6 月,大气中积分汽态水逐月增加,主要是由于天气系统逐月增多、气温逐月变暖引起上升气流活动不断加强的结果。因为当有天

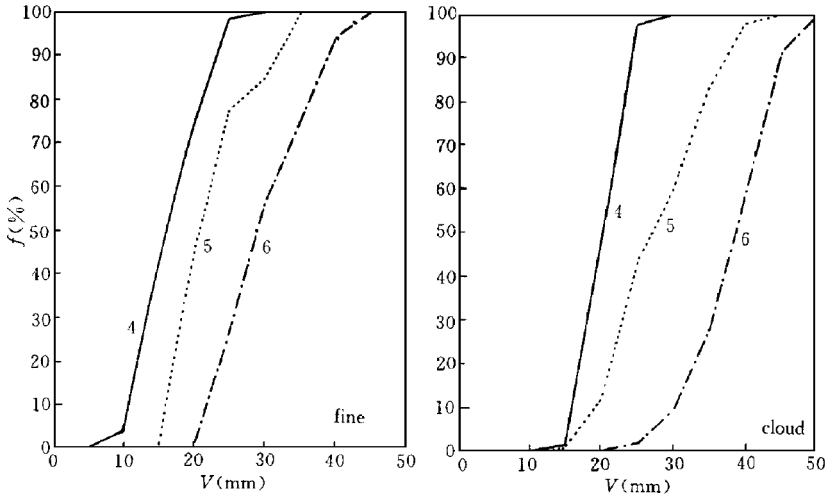


图 1 气态水含量 V 值积分频率(f)分布(实线 4 月,点线 5 月,点划线 6 月)

气系统影响时,高空气流输送水汽及低层对流向上输送水汽,导致大气中有天气系统时积分气态水含量的增加.由此可见,天气条件的变化,是决定大气中气态水含量变化的主要原因.

2.2 液态水含量的频率分布

根据微波辐射计连续监测的 4~6 月中层状云系积分液态水资料,对云中积分液态水含量 L 值随月份的变化规律进行了统计分析,分析结果见图 2.

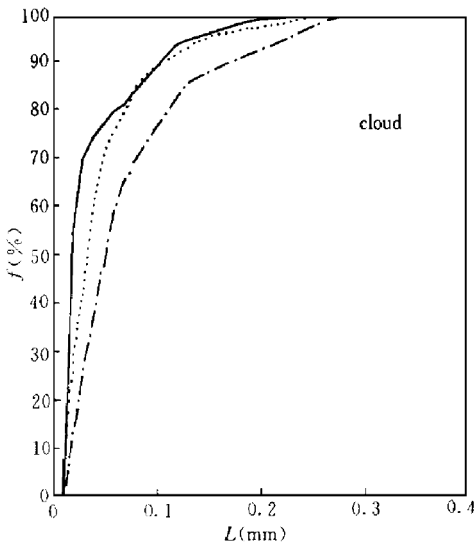


图 2 液态水含量 L 值积分频率(f)分布
(实线 4 月,点线 5 月,点划线 6 月)

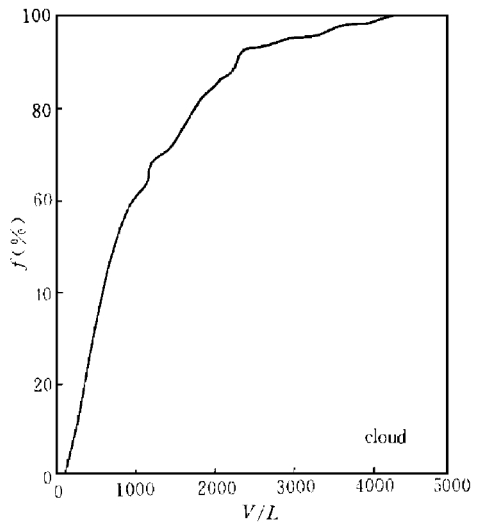


图 3 大气中气态水与液态水比值的
频率(f)分布图

分析图2中积分液态水含量 L 值随月份的变化曲线表明,在降水性层状云中,一般情况下,当云中积分液态水含量 L 值超过 0.3 mm 时,就会出现降水,因此可以把地面微波辐射计实时监测的 $L=0.3\text{ mm}$ 作为层状云是否产生降水的临界值.统计表明, L 值与降水强度有较好的线性相关关系.这一结论与文献[8]根据实时监测 L 值与地面降水的演变资料分析的结果是一致的.另外,图2中显示,在有云无雨的天气条件下,云中积分液态水含量 L 值的变化幅度为 $0.01\sim 0.3\text{ mm}$. L 值的中值随月份的增加而增大,分别为4月 0.02 mm ,5月 0.04 mm ,6月 0.05 mm .显然,5~6月的 L 值比4月大的原因,也是由于天气系统随着月份的增加而加强,而4月份的天气系统一般较5、6月份弱,所以云中积分液态水含量也相对偏低.

2.3 有云大气中汽态、液态水含量的相对分布

大气中的水基本上是以汽态形式存在,汽态水本身无法形成降水,只有在一定的大气条件下,汽态水凝结成云滴或凝华成冰晶,即以云的形式存在于云中的液态或固态水,才有可能通过自然过程或人工影响产生降水.因此,从人工增雨需要考虑的云水资源条件和人工催化的潜力出发,一般认为人工增雨的资源条件是指云中还没有通过自然过程转化为降水的液态水.因此,大气中水汽含量条件不能准确反映云水的资源条件和人工增雨的催化潜力.可见,了解有云大气中汽态和液态水的相对分布特点是十分重要的.

图3给出了有云天气条件下,大气中垂直积分汽态和液态水比值 V/L 的频率分布特征.图中显示,在有云无雨时,汽态水和液态水的比值一般为 $100\sim 4000$,中值为750,这表明液态水在大气总含水量中所占的份额不到1%.

综上所述,作为云水资源条件的液态水仅占大气总含水量的一小部分,而以往通常采用大气中的水汽含量评估水资源条件的方法,显然带有很大的不精确性.

2.4 与国外观测结果比较

80年代,美国开始利用地基微波辐射计连续监测云中液态水的垂直积分含量,随后,澳大利亚等国也开始应用这种新技术.为了比较,将本项研究于1992~1994年4~6月期间在河北省观测的结果与上述国外观测结果一并列于表5中.

比较表5中数值可以看出,由微波辐射计在河北省4、5月份观测的云中积分液态水含量 L 值与澳大利亚和美国夏季观测的结果较一致,6月份要比美国、澳大利亚观测值高,而河北省观测值要比美国、澳大利亚冬季观测值高得多.

表5 云中垂直积分液态水与国外观测结果比较

| 观测地点 | 液态水含量厚度(mm) | 观测年份 |
|---------|-------------|-------------------------------|
| 美国科罗拉多州 | 中值 0.4 | 1985 年夏 |
| 澳大利亚 | 中值 0.4 | 1988 年冬 ^[12] |
| 美国犹他州 | 中值 0.062 | 1982 年冬 ^[13] |
| 美国科罗拉多州 | 中值 0.078 | 1983, 1985 年冬 ^[14] |
| 澳大利亚雪山 | 中值 0.149 | 1985 年夏 |
| 中国河北 | 中值 0.45 | 1992~1994 年 4 月 |
| 中国河北 | 中值 0.44 | 1992~1994 年 5 月 |
| 中国河北 | 中值 0.64 | 1992~1994 年 6 月 |

3 小 结

根据 1992~1994 年 4~6 月间,利用双通道微波辐射计连续监测的资料,分析了晴空、有云无雨两种天气条件下,大气中垂直积分气态、液态水的分布特征,并与国外某些观测结果作了比较,初步得出以下几点结论:

(1)大气中积分气态水的中值,在相同天气条件下,随月份的递增一般增加 30%~40%;在相同月份中,按晴空、有云无雨两种天气条件的改变,积分气态水含量的中值也递增 30%~40%,说明天气条件的变化是水汽含量变化的主要原因。

(2)在降水性层状云系中,当云中垂直积分液态水含量 L 值超过 0.3 mm 时,就会产生降水,这一数值可作为层状云是否产生降水的临界值;当有云无雨时, L 值的变化范围为 0.01~0.3 mm,其中值随月份的变化范围为 0.02~0.05 mm。

(3)分析有云无雨天气条件下,大气中气态水和液态水含量的相对分布特点表明,在有云无雨时,大气中气态水与液态水的比值(V/L)一般为 100~4000,中值为 750,即液态水在大气总水量中所占的份额不足 1%。这一结果表明,作为主要云水资源条件的云中液态水含量,仅占大气中总含水量的一小部分,而以往通常采用大气中的水汽含量评估云水资源条件的方法,显然带有很大的不精确性。

(4)大气中积分液态水含量与美国、澳大利亚的观测结果比较表明,自然云系中垂直积分液态水含量 L 值的大小与季节及其对应的天气条件关系较大,而与观测点所在地理位置的不同关系不大。

参 考 文 献

- 1 游来光. 利用粒子测量系统研究云物理过程和人工增雨条件. 见:游景炎等主编. 云降水物理和人工增雨技术研究. 北京:气象出版社,1994. 236~249.
- 2 Heggli Mark, Rauber Robert M, Snider J B. Field evaluation of a dual-channel microwave radiometer designed for measurement of integrated water vapour and cloud liquid water in the atmosphere. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 1987, 4: 204~213.
- 3 Warner J and Drake J. Field tests of an airforce remote sensing technique for measuring the distribution of liquid water in convective cloud. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 1988, 5: 833~843.
- 4 赵柏林,尹宏,李慧心,等. 微波遥感大气层结的原理和实验. 中国科学,1980,(9): 874~882.
- 5 周秀骥. 大气微波辐射计及遥感原理. 北京:气象出版社,1982.
- 6 赵柏林,傅强,杜金林,等. 微波遥感大气特征及天气变化. 中国科学(B),1990,4: 440~448.
- 7 赵从龙,蔡化庆,宋玉东,等. 对流层水汽和液态水的地基微波遥感探测. 应用气象学报,1991,2(2): 200~207.
- 8 胡成达,朱元竞. 微波辐射计. 见:游景炎等主编. 云降水物理和人工增雨技术研究. 北京:气象出版社,1994. 216~220.
- 9 朱元竞,胡成达,钱春生,段英. 微波辐射计在人工影响天气中的应用. 见:游景炎等主编. 云降水物理和人工增雨技术研究. 北京:气象出版社,1994. 207~215.
- 10 Duan Ying, Wu Zhihui, Shi Lixin. Measurement of Liquid Water Content in Clouds with a Ground-Based Microwave Radiometer. WMO Workshop on Measurements of Cloud Properties for Forecasts of Weather, Air Quality and Climate, Mexico city, 23~27 June, 1997.
- 11 Drake J F and Warner J. Theoretical study of the accuracy of tomographic retrieval of cloud liquid water with an

- airborne Radiometer. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 1988, **5**: 844~857.
- 12 Long A B and Huggins A W. Australian winter storms experiment (AWSE)I; Supercooled liquid water and precipitation enhancement opportunities. *J. Appl. Meteor.*, 1992, **31**: 1041~1055.
- 13 Hill G E. Evaluation of the Operational Weather Modification Program. Final Report. NOAA contract, NA81RaC00023. UWRL/A-82102, 191. Utah State University, 1982.
- 14 Super A B and Holroed E W. Characteristics of Supercooled Liquid Water, Episodes over the Grand Mesa, Colorado. Papers Presented at the Fourth WMO Scientific Conference on Weather Modification, WMO/TD-No. 53. 1985. 391~395.

MONITORING THE DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF LIQUID AND VAPOUR WATER CONTENT IN THE ATMOSPHERE USING GROUND-BASED REMOTE SENSING

Duan Ying Wu Zhihui

(Hebei Weather Modification Office, Shijiazhuang 050021)

Abstract

Based on the observational data from a new generation ground-based microwave radiometer with double channels and coantenna developed by Peking University, the distribution characteristics of integral liquid and vapour water content in the atmosphere are analysed on the conditions of clear air and cloud without rain during April to June from 1992 to 1994 in Shijiazhuang of Hebei Province. The results indicate that the liquid water makes up one percent of the total water content in the atmosphere without rain, the liquid water resources in clouds for artificial precipitation are only little part of the total. Therefore, the analysis shows that the conventional method of using water vapour content in the atmosphere to estimate cloud water resources is very overstatement.

Key words: Ground-based remote sensing Vapour water Liquid water Distribution law