

机载微波辐射计测云中液态含水量^{*}

金德镇

(吉林省人工影响天气办公室, 长春, 130062)

雷恒池

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

谷淑芳

(吉林省人工影响天气办公室, 长春, 130062)

魏重

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

郑娇恒 张景红 李茂伦 陈知新

(吉林省人工影响天气办公室, 长春, 130062)

沈志来

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

摘 要

文中介绍了 2001~2002 年 4~7 月吉林省人工增雨期间, 在中国首次进行的机载对空微波辐射计外场飞行观测试验。观测结果表明, 仪器可以灵敏地探测出层状云中垂直路径积分云液态水和过冷水含量及其变化, 揭示了在层状云中嵌入的对流区中有丰富的垂直积分过冷水含量, 量级可达 10^3 g/m^2 。与地面雷达 PPI 回波强度呈正相关。本文还根据飞机上升(或下降)过程的探测数据, 给出了水平均匀的层状云液态含水量的垂直廓线的实例, 并进一步讨论了这种方法的应用前景。

关键词: 机载微波辐射计, 云过冷水, 云液水, 遥感探测。

1 引 言

云中液态含水量是云和降水过程研究的一个极为重要的物理参数, 而云中过冷水含量则是人工影响降水需要特别关注的量。目前, 由于测量手段不多, 云液水和过冷水含量定量资料十分缺乏。在已有的探测手段中, 比较早发展的是直接探测仪器。在 20 世纪 40~70 年代, 用手动含水量仪测量云中液态水含量, 主要原理是滤纸色斑法。这种方法对于人们最初定量研究云中液态水含量起到重要作用。但是, 手工操作的低取样率和烦琐的资料处理方式限制了它的应用, 之后, 有一些自动记录装置出现^[1]。到目前为止, 常用的自记仪器有 JW 热线含水量仪, King-CSIRO 热线含水量仪, 由 PMS 生产的 FSSP-100 测得的粒子浓度推导出的含水量, 云滴碰撞-复制仪, 还有 Rosemount 生产的专门用于测量过冷水的结冰探测仪^[2] 等等。直接测量的局地准确性高, 但是, 它的取样体积十分有限, 取样代

表性不理想。20 世纪 60 年代起, 被动遥感探测技术引入气象领域, 明显改善了取样代表性。其中, 地基微波辐射计以其高时间分辨率、高探测精度、可无人值守长期连续观测、能测量整层气柱积分水汽和云液水含量、在地面温度低于零度时可以从混合相态的云中探测出过冷水等一系列特点, 成为一种新型的测云液水工具。但是, 地基微波辐射计难以快速移动, 缺少径向分辨能力, 限制了它的应用范围。20 世纪 80 年代就有作者指出, 在飞机上安装遥感仪器是研究中小尺度问题的有效方法^[3]。机载对空微波辐射计, 继承了地基仪器的优点, 同时又可以灵活快速地在不同层次和地区穿云飞行, 具有更广泛的应用前景。然而, 目前测云液水的机载仪器并不多, 仅美国^[4,5] 和前苏联^[6] 有少量的观测工作。他们采取的观测方式是在云底水平飞行, 仪器通过双向天线交替对相互成一定角度(比如 60° 角)的两个方向取样, 根据层析技术的原理进行反演, 获得云中液水的二维空间分布。目前, 这种观测方式在探

* 初稿时间: 2003 年 2 月 10 日; 修改稿时间: 2003 年 6 月 9 日。

资助课题: 国家自然科学基金项目(40275002), 吉林省人工影响天气开放实验室基金, 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-22)

测精度等方面仍面临问题,处于原理验证阶段,投入应用仍需时日。为适应中国云雾物理研究和人工增雨作业的需要,中国科学院大气物理研究所和吉林省人工影响天气办公室合作,委托中国科学院长春分院地理所在中国首次研制了 9.5 mm 对空机载微波辐射计^[7],该仪器天线单向垂直对空,可以在云底或云中任意层次进行飞行观测,得到仪器上空垂直路径积分云液水含量。由于观测方式简单,预期将会较快地在人工增雨的实际应用中发挥作用。该仪器于 2001 和 2002 年 4~7 月吉林省人工增雨作业期间进行了观测飞行试验,文中简要介绍与观测有关的情况,通过典型观测个例分析表明仪器测云液水、过冷水以及云液水廓线的能力,并进一步讨论了它的应用前景。

2 观测仪器、标定和反演方法

观测平台是吉林省人工增雨作业用的运-12 型飞机。其飞行速度在 70 m/s 左右,飞行高度范围在 0.5~6.0 km。微波辐射计天线和接收机安装在机舱顶部,天线在机外垂直向上,由波导与机舱内部接收机相连,观测数据由计算机自动获取和存储,并显示数据记录曲线。飞机上除了微波辐射计外,还有 PMS 粒子测量系统, GPS 全球定位系统,温度和湿度测量仪。此外,地面还有天气雷达、雨量计等测量手段。这样的观测平台为辐射计观测的验证提供了帮助。

辐射计的仪器指标及标定方法,在文献[7]中作了详细介绍,资料的反演方法在文献[8]中作了讨论。这里只将有关情况作简单介绍。该仪器工作频率为 31.65 GHz(波长 9.5 mm),中频带宽为 400 MHz,采用锥型喇叭天线,其 3 dB 波束宽度为 7.2°,灵敏度为 0.2 K,积分时间为 1 s,数据获取速率为 1 次/2 s,功耗为 200 瓦,接收机重为 15 kg。采用两点标定的方法将接收的原始数据转化成辐射亮温值。再根据文献[8]中反演公式和相应各月平均的反演系数,由亮温得到仪器上空垂直气柱中的积分云液水含量。

3 云液态水含量的测量

在吉林省人工增雨期间(2001 和 2002 年 4~7 月),机载微波辐射计进行有效观测 10 架次,累计飞行近 20 h。多数情况下探测是随作业航线进行,进行有设计的飞行探测较少。下面以 3 个个例分析

仪器探测云液水、过冷水和云液水廓线的能力。

3.1 2001 年 7 月 9 日

3.1.1 天气形势和航线云况

在 7 月 8 日 20 时 850 hPa 天气分析图上,高空低压中心位于贝湖以东赤塔附近,高空槽后低压中心经北京向西南—直伸展到西藏昌都,副高偏西伸入中国西南部。高空槽后有 -12 °C 冷中心,槽前暖平流明显。自孟加拉湾—贝湖为大风低压区,水汽沿西南急流北上,随着高空槽东移,与北部下滑冷空气交汇形成降水。冷空气南侧,沿 40°N 有一条近似东(北)西(南)向的锋区,其上有较宽长云带。7 月 9 日的卫星和地面雷达监测表明,在吉林省上空有大面积层状云系覆盖。午后长春南偏东方向,有一条呈东(北)西(南)走向的宽度在 40~70 km 的较强雷达回波(大于 25 dBZ)带,自西向东缓慢移动。图 1 中粗实线给出作业飞行航迹:14 时 08 分作业飞机从长春出发,向南依次经过怀德、辽源,再向东到磐石,然后依次在磐石、伊通、双阳等上空沿西北—东南方向,多次做横跨较强回波带的折返飞行,于 15 时 13 分返回长春。飞行路线所经过的区域上空,1~3 km 高度为层积云,3.5~7.0 km 高度为高层云和卷积云。当日探空表明零度层高度在 3.8 km 左右。



图 1 飞行航迹图

(实线:2001 年 7 月 9 日,虚线:2002 年 4 月 22 日)

Fig.1 Chart of the flight courses (solid line: July 9, 2001; dotted line: April 22, 2002)

3.1.2 云中液态含水量和过冷水含量

图 2 给出 7 月 9 日穿云飞观测结果。从图 2 可以看到 L 曲线的一些特点。首先,以 R2 时刻为界,其前后 L 数值有明显变化,由前面平均 2500 g/m² 左右降到后面平均 1200 g/m² 左右。对图 2 中标注的 R1, R2, R3 3 个时刻的雷达回波情况分析表

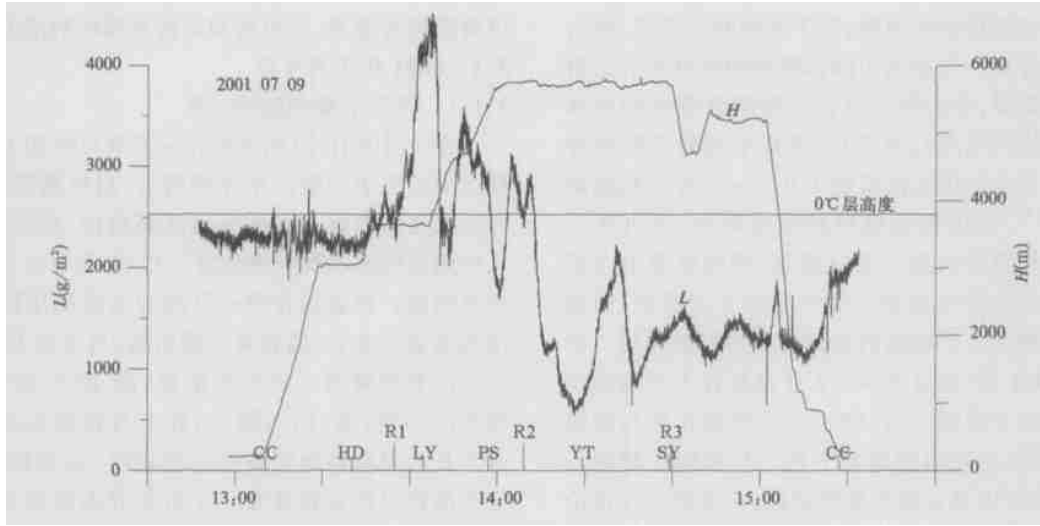


图2 2001年7月9日飞机观测的云液态水含量的时间(空间)序列
 (细实线为GPS全球定位系统测量的飞行高度H,细直线表示0℃层高度。R1,R2,R3标注的竖线分别表示地面气象雷达3次低仰角PPI扫描的观测时刻,CC,HD,LY,PS, YT, SY, CC标注的短竖线分别表示飞机途经长春、怀德、辽源、磐石、伊通、双阳、长春等城市上空的时间)

Fig. 2 Temporal(spatial) series of cloud liquid water content measured by the airborne radiometer on July 9, 2001 (Fine realline stands for the flight height (H) measured by GPS system and fine beeline is height of 0 °C level. vertical lines R1, R2, and R3 represent the times of three PPI observations by ground meteorological radar at low - elevation, respectively. The shorter vertical lines CC, HD, LY, PS, YT, SY, CC represent the time when the plane flew over the cities of Changchun, Huaide, Liaoyuan, Panshi, Yitong, Shuangyang, and Changchun, respectively)

明,午后长春东南方向,有一条呈东北西南走向的宽度在40~70 km的较强雷达回波(大于25 dBz)带,自西向东缓慢移动。

图3给出其中R1时刻(13:36:34)的PPI扫描回波图,图中CC—HD—LY—PS—YT—SY—CC环行细实曲线即是图1中已给出的该日探测航线:长春—怀德—辽源—磐石—伊通—双阳—长春,细实曲线上实心圆点1,2,3所在位置,分别表示上述3次雷达观测时刻飞机所在的地理位置。实际上图3给出的就是飞机处于实心圆点1位置时的雷达回波。综合3次雷达回波可见,R1时刻飞机即将进入回波较强区域(最强可达30~35 dBz),R2时刻飞机刚刚飞离回波较强区,到R3时刻在飞行区域的回波已较松散,其强度已减弱到15 dBz以下。图2中R2时刻以后曲线平均值明显较之前的平均值低,正是R2时刻之后飞行路线移出较强回波区的反映。该L曲线的另一特点是,在怀德和辽源之间开始出现周期大约10~20 min(对应空间距离40~80 km)的幅度相当大的周期变化,之后虽然振荡的幅度大

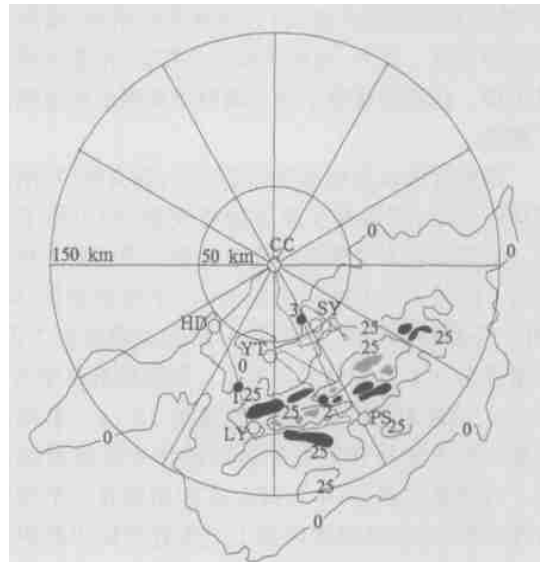


图3 2001年7月9日13:36:34雷达(1.1°仰角)PPI扫描回波图(填充黑色的区域为回波强度大于30 dBz,填充灰色区域为回波强度小于20 dBz)
 Fig. 3 PPI radar echo chart at 13:36:34, July 9, 2001 (elevation 1.1°)(black areas represent where the intensity of radar echo higher than 30 dBz, gray areas represent where the intensity of radar echo lower than 20 dBz)

小不同,但这种准周期的变化特点一直持续到飞机飞过双阳,这是飞行路线多次往返横跨这条东北西南走向的较强雷达回波带的反映;仔细分析图 3 还可发现,这个较强回波带中间,有一较弱(最低值小于 20 dBz)的区域,这些区域呈条状,其排列走向与整个回波带走向平行。在这个较弱回波带的两侧,交错地分布着一些回波强度更强(30~ 35 dBz)的短条状区域,其排列走向也与整个回波带一致。图 2 中 L 曲线在辽源—磐石—伊通之间各峰值段还有周期约为 5 min (空间 20 km) 左右的更小的起伏,正是这个较强回波带中间存在强—弱—强的带状回波区的反映。由上面分析可见,云中过冷水含量的大小与地面天气雷达的 PPI 回波强度有较好的正相关关系,表明镶嵌在层状云中的对流区域上空过冷水的含量比其他地方更丰富。

3.2 2002 年 4 月 22 日

3.2.1 天气形势和航线及云况

2002 年 4 月 22 日 08 时 500 hPa 天气图上,中蒙边界有一高空槽,槽后有 -40 °C 冷中心,槽前锋区呈“V”型,西南急流较明显,水汽区自黄海渤海北伸至吉林省。低层 850 hPa 图上,有高空槽在吉林省中部,锋区呈东北—西南走向,5 个纬距内达到 5 条等温线,密集区位于吉林省中部,风切变明显。地面影响系统为一蒙古气旋及其冷锋,降水主要产生在冷锋后部冷暖空气交汇处。冷高压主体较偏后,位于萨彦岭一带,但冷高压前部南北向等压线明显,正变压大,说明冷空气势力较强。高空冷涡和低层锋区对应的冷锋是这场降水主要的动力条件,西

南急流输送的水汽较充沛,水汽条件较好,故降水产生在冷暖交汇的吉林省中东部。图 1 中虚线给出该日作业飞行航迹:飞机 08:25 从由长春起飞,依次经过双辽—四平—辽源—磐石—双阳之后,11:00 返回长春。飞行航线上有高层云(As)和层积云(Sc)。雷达观测 As 云的云顶高为 5.5 km 左右。

3.2.2 云中液态水含量和过冷水含量

从云中液态含水量时间序列(图 4)可见,除了飞机起飞和着陆飞行外,本次飞行探测大部分时间是在零度层高度(1460 m)以上进行。这期间大体可分为 3 个时段(在图中时高曲线上依次标注为 a—b, c—d, 和 e—f 段),各时段内过冷水含量分别在 3 个水平上。为进一步了解飞行航线上云雨的情况,我们对飞行期间的 4 次雷达 PPI 回波进行分析,结果发现 R1, R2, R3 各个时刻回波的位置和强度变化不大。R4 时刻较强回波带的位置与前面几次相比稍向北移,回波强度和范围有所减弱。图 5a 和 5b 给出了 R3 和 R4 时刻的回波图,雷达观测时对应飞机所在水平位置在图中以‘■’符号标出。由图 4 可见, a—b 飞行段(09:02~ 09:34)云液水含量起伏较小,平均在 250 g/m² 左右,这时段航线处于长春—双辽—四平之间。图 5a 表明,这一段飞行路线处于较弱回波区域,强度在 20 dBz 以下;图 4 中 c—d 飞行段(9:38~ 10:08)中液水含量值在 300~ 700 g/m² 之间,明显比另两个时间段的值高,同时可以

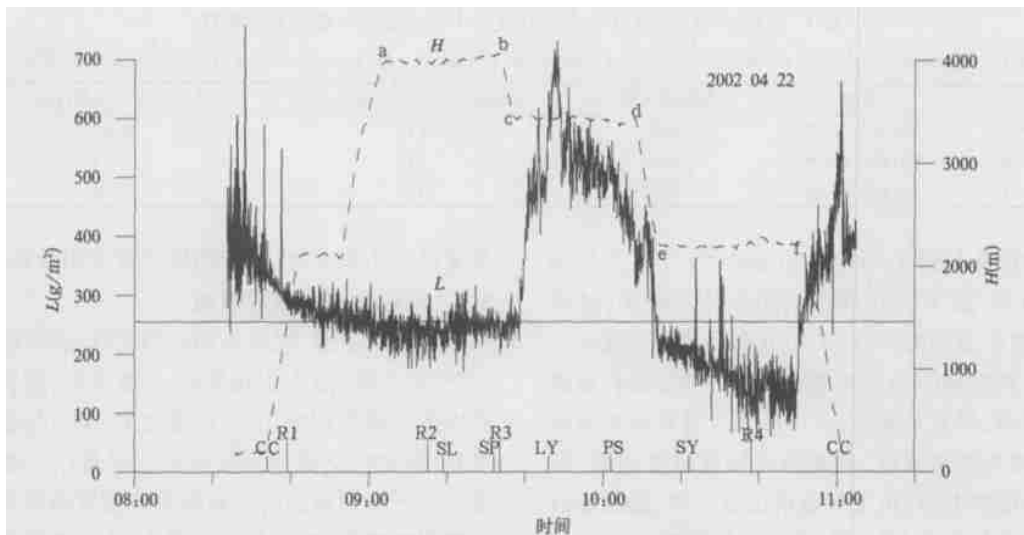


图 4 2002 年 4 月 22 日一次飞行观测的云液水含量的时间(空间)序列
(以 R1, R2, R3, R4 分别为相应的雷达扫描时刻,各曲线的意义同图 2)

Fig. 4 Temporal(spatial) series of cloud liquid water content measured by the airborne radiometer on April 22, 2002 (R1, R2, R3, and R4 respectively represent the corresponding time of radar scan; the rest lines have the same meaning as in Fig. 2)

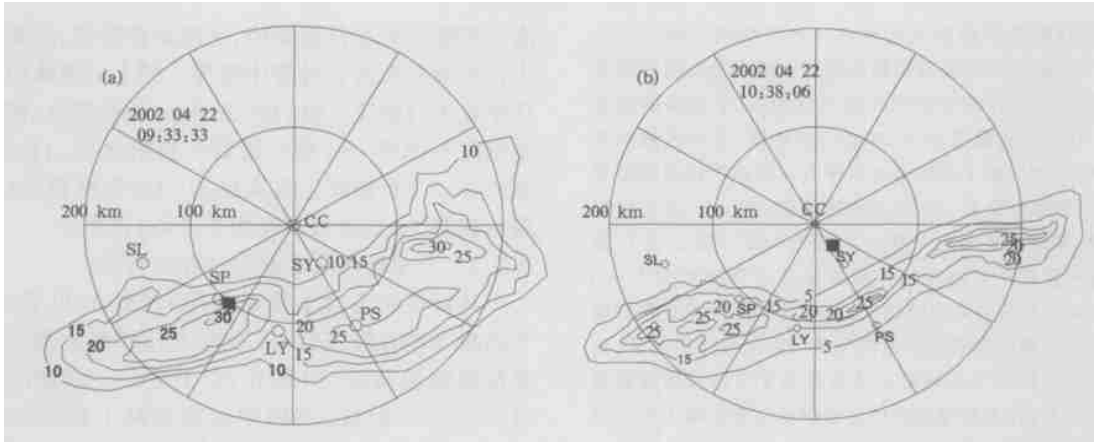


图5 2002年4月22日雷达回波

(a. 09:33:33 PPI(0° 仰角), b. 10:38:06 PPI(0° 仰角))Fig. 5 Radar Echo on April 22, 2002(a. 09:33:33 PPI(elevation 0°), b. 10:38:06 PPI(elevation 0°))

看到时间尺度在 2~4 min(对应空间尺度在 8~16 km)的波动,很可能是对流产生的不均匀结构。这时段内,飞机过四平经辽源向磐石一线飞行,由图 5a 可见,在四平和辽源之间确实存在强回波区最大值超过 30 dBz,辽源和磐石之间也被较强回波区覆盖,最大值可达 25 dBz;图 4 中 e-f 飞行段(10:14~10:50)云液水含量最低,在 200~100 g/m^2 之间。图 5b 表明,在这时段内飞机经双阳向长春飞行,其间飞机已进入弱回波区域,强度在 5 dBz 以下。上面分析再次表明,云中垂直积分过冷水的多少与雷

达 PPI 回波的强度有较好的正相关关系。

将雷达观测的云顶高度和机上目测的云底高度结合,推算 3 个时段中有效的(飞行高度以上的)云厚,分别将 3 个时间段的积分过冷水含量的平均值除以相应的有效云厚,即得到 3 个时间段云中过冷水含量的平均值(g/m^3),有关数据归纳在表 1 中。由表可见,即使在春季这里云中某些区域的过冷水也是相当丰富的,在同一云系的不同区域,过冷水含量的差别相当明显。

表 1 2002 年 4 月 22 日 3 个飞行时段中与云液水含量有关的参数

Table 1 Parameters relevant to cloud liquid water content in the three time periods during the flight on April 22, 2002

时段	时间	平均有效云厚(m)	平均积分过冷水含量(g/m^2)	平均过冷水含量(g/m^3)
a-b	09:02~09:34	4000	217	0.14
c-d	09:38~10:08	3420	449	0.22
e-f	10:14~10:50	2200	167	0.05

比较图 4 与图 2,可以看出 2001 年 7 月 9 日和 2002 年 4 月 22 日两次观测到的积分云液水(过冷水)含量值明显不同,前者平均值比后者高出近一个量级。这种差别的原因可能不是单一的:前者观测时间是夏季,后者是春季,云中液水含量存在季节差异;两者都为冷锋系统,但是前者较强后者较弱,存在天气系统的差异;机上颠簸情况也不同,前者颠簸强烈后者飞行平稳,从地面雷达回波强度看前者也比后者强,表明存在云中对流弱强的差异等等。尽管还需要积累更多的观测资料才能作更深入的分析,但是,现有的观测结果已经表明,我们研制的机载微波辐射计已可以客观地反映不同系统中液态水

含量的大小和变化,测量结果已有实用价值。

3.3 液态含水量垂直廓线

从原理上说,在水平均一的层状云中,取仪器在上升(或下降)过程中观测的 L 值序列,逐次计算系列中适当高度间隔上的 L 值之差(dL)与相应的高度差(dh)之比,就得到云液态含水量(w)的垂直廓线。由于我们研制的仪器探测灵敏度和取样的时间分辨率都较高,使我们有可能利用观测资料具体实现这一探测云液水廓线方法。

图 6 给出 2001 年 7 月 8 日上午 1 次飞行爬升过程中得到的云液水垂直分布廓线,其高度间隔 dh 为 200 m。该次作业航线上为大面积层状云系,下

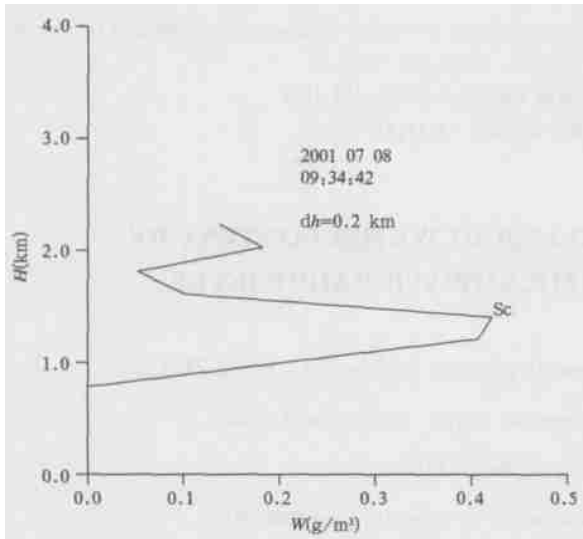


图6 2001年7月8日云液水含水量垂直分布廓线

Fig. 6 Vertical profile of cloud liquid water content measured by the radiometer on July 9, 2001

部为 Sc 云上部为 As 云。该廓线表明, 云底在 800 m 左右, 在云底之上约 700 m 处出现液态水含量的峰值 0.42 g/m^3 , 峰值之上, 云液水含量随高度增加而减小, 在高度 1700~2000 m (云底之上 900~1200 m) 处云液水含量较小只有 0.05 g/m^3 左右, 2000 m 以上云液水含量又有增加。这个观测的结果与一般层积云中云液水的垂直分布情况比较一致。

应该指出, 该次飞机由地面上升到 4000 m 高空的过程持续大约 15 min (9:34~9:49), 上升的同时飞机水平横过了大约 50 km 的空间。地面雷达 PPI 回波和机上宏观观测都表明, 上升航程的前 8 min 左右, 飞机处于水平均一性较好的层状云中, 但是后 7 min 飞行在水平不均一的对流区的上空, 在对流

区内不同高度间隔上的 L 值之差不仅包含云液水的垂直变化而且包含水平变化, 在很多情况下后者比前者还要大, 不能得到真实的液水垂直廓线。

4 小结与讨论

本文为中国首次研制的机载对空微波辐射计于 2001~2002 年野外飞行观测实验数据的初步分析。结果表明:

(1) 所用机载微波辐射计能够及时地探测云中垂直路径积分液态水和过冷水含量, 并能灵敏地反映其变化。对比分析表明, 高空云液水含量与地基雷达的回波强度有较好的正相关关系。

(2) 观测得到了云中垂直积分液水含量的定量结果, 所获取的资料在云和降水物理研究、人工增雨播撒条件选择和效果检验等方面已有实用价值。观测结果表明, 在吉林省的春和夏季的层状云云系中, 特别是那些嵌入的较强对流区中, 有丰富的过冷水, 数值可达 10^3 g/m^2 以上。同类云系的不同个例之间, 以及同一云系的不同区域中, 无论是积分云液水还是积分过冷水含量的数值差异较大, 可达两个量级。

(3) 利用飞机上升(或下降)过程的高时间分辨率观测资料, 得到了一定垂直间隔中云液态水含量, 进而得到了云液水的垂直分布廓线的实例。目前, 受飞机飞行方式的限制, 只有那些具有水平均一性的云, 求取的廓线才有实用意义。若进一步改善运载平台的工作方式(比如, 使飞机作有设计的螺旋式上升飞行, 或将仪器的观测平台加以改进, 使之能在较短的时间内由地面垂直升到高空), 则在对云的类型及状况无任何要求的条件下, 微波辐射计都可以很方便地探测云的液水垂直分布, 成为不可多得的测云液水廓线的工具。

参考文献

- 1 Baumgardner D. Empirical evaluation of airborne liquid water measuring devices. *J Rech Atmos*, 1979, 13(4): 316.
- 2 Claffey K J, Jones K F, Ryerson C C. Use and calibration of Rosemount ice detectors for meteorological research. *Atmos Res*, 1995, 36(3-4): 277~286
- 3 Robert J, Serafin, Gerard Szejwach, et al. Applications of airborne remote sensing in atmospheric sciences research. *J G R*, 1986, 91(C2), 2510~2516
- 4 Drake J F, Warner J. A theoretical study of the accuracy of tomographic retrieval of cloud liquid with an airborne radiometer. *J Atmos*, 1988, 5: 844~857
- 5 Warner J, Drake J F. Field tests of an airborne remote sensing technique for measuring the distribution of liquid water in convective cloud. *J Atmos*, 1988, 5: 833~843

- 6 Koldaev A V, Melichuk Yu V, Mironov A F. Remote sensing investigation of cloud liquid water space distribution. Proceedings in 11th International Conference on Cloud and Precipitation. Montreal :Elsevier Science Publishers, 1992, 573~ 575
- 7 雷恒池, 魏重, 沈志来等. 机载微波辐射计测云液水含量 I: 仪器和标定. 高原气象, 2003, 22(6): 551~ 557
- 8 江芳, 魏重, 雷恒池等. 机载微波辐射计测云液水含量 II: 反演方法. 高原气象, 2004, 23(1): 33~ 39

MEASUREMENT OF COLUMN CLOUD LIQUID WATER CONTENT BY AIRBORNE UPWARD-LOOKING MICROWAVE RADIOMETER

Jin Dezhen Gu Shufang Zheng Jiaoheng Zhang Jinghong Li Maolun Chen Zhixin

(*Jilin Precipitation Enhancement and Hail Suppression Office, Changchun 130062*)

Lei Hengchi Wei Chong Shen Zhilai

(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Abstract

In this paper, the first field observations were introduced on vertically path-integrated super-cooled cloud liquid water content (SCCLWC) as well as vertically path-integrated cloud liquid water content (CLWC) by using an Airborne Upward-looking Microwave Radiometer in Jilin Province of China during the operations of precipitation-enhancement from April to July in 2001 and 2002. The results show that the equipment can perfectly measure the SCCLWC and CLWC as well as their changes in sheet clouds. It was found that the SCCLWC, especially for convection cells inlaid in sheet clouds, is much abundant with magnitude level up to 10^3 g/m and show significant non-homogeneity. The horizontal distributions of the SCCLWC are correlated with the distributions of PPI echo intensity of surface weather radar. Using the data obtained during the ascent (or descent) courses of the plane, a profile of cloud liquid water (CLW) content is given, and the application prospect of the profiling-CLW method is discussed.

Key words: Airborne microwave radiometer, Cloud super cooled water, Cloud liquid water, Remote sensing.