

张志红,周毓荃. 一次降水过程云液态水和降水演变特征的综合观测分析[J]. 气象,2010,36(3):83-89.

一次降水过程云液态水和降水 演变特征的综合观测分析^{* 1}

张志红^{1,3} 周毓荃²

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 江西省人工影响天气办公室, 南昌 330046

提 要: 利用 IP/WVP-3000 地基微波辐射计、多普勒雷达结合卫星及地面雨量计等多种遥感观测资料,对 2007 年 6 月 30 日北京地区的一次积层混合云降水过程的云液态水和降水的分布及演变特征进行了综合观测分析。分析表明:降水开始前,辐射计液态水含量有明显增加,地面降水的产生滞后于液态水含量增加一段时间,利用这种现象,可用于提前预测云系正处于降水产生的发展阶段,应用于人工增雨作业。在相同时间对同一位置进行探测的雷达和辐射计资料显示,雷达回波垂直分布趋势与辐射计液态水的垂直分布趋势有着较好的对应关系。此外空中液态水分布,特别是低层液态水的分布,与地面降雨的产生有着直接的关系。

关键词: 云液态水含量,微波辐射计,多普勒雷达

Analyses of Composite Observations of Cloud Liquid Water and Precipitation on the Evolution Features

ZHANG Zhihong^{1,3} ZHOU Yuquan²

1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Weather Modification Office of Jiangxi Province, Nanchang 330046

Abstract: It was carried out a comprehensive observation and analysis of a mixed convective-stratiform precipitation in Beijing on 30 June, 2007, by using IP/WVP-3000 ground-based microwave radiometer, Doppler radar, satellite data, ground gauge and other observational data. The results showed that, there was a marked increase in the total liquid water content detected by the ground-based microwave radiometer, before the start of precipitation. Precipitation lagged behind the emergence of liquid water content began to increase for some time. By use of that phenomenon, it may be early warning in the stage of the development of precipitation, and applied to artificial rainfall. It showed that the vertical distribution trends of radar reflectivity and liquid water content detected by ground-based microwave radiometer had a good relationship, when detecting at the same time and same location. In addition, the distribution of the cloud liquid water, especially the low-level liquid water, had a direct relationship with the ground rainfall.

Key words: cloud liquid water content, microwave radiometer, Doppler radar

引 言

云和降水的形成、发展除了受动力、热力条件影响外,其内部的微物理过程也起着重要的作用。研

究发现,云中微物理因素的微小变化都能影响到云的结构、降水等^[1]。所以对云降水结构,特别是云系中液态水的分布及其演变规律等的研究,对于了解云和降水的形成,提高预报准确率以及判断人工播云催化条件等方面具有十分重要的意义。近年,国

* 国家科技支撑计划课题“人工增雨信息处理技术研究”(2006BAC12B07)

2008 年 5 月 15 日收稿; 2009 年 8 月 3 日收修定稿

第一作者:张志红,主要从事云降水物理和人工影响天气研究和业务技术工作. Email: zzh821110@163.com

内不同地区针对云降水结构的特征进行了系列研究^[2-6],随着微波辐射计等探测手段的应用,为加强对云降水物理结构的进一步了解提供了新的手段和资料^[7-11]。

借助于雷达、卫星、飞机、微波辐射计等多种综合探测手段,来分析云系的宏微观结构,有助于建立云降水的多尺度结构模型,为确定科学的人工增雨催化方案提供重要依据。所以本文将综合利用卫星、雷达、飞机 PMS 和 12 通道 IP/WVP-3000 微波辐射计等多种探测手段,以雷达和 IP/WVP-3000 辐射计资料为主,结合卫星和地面雨量站等资料,对 2007 年 6 月 30 日北京地区的一次积层混合云降水过程进行综合观测分析,深入研究分析其降水过程中云液态水和降水的分布及其演变特征。

1 探测手段与资料介绍

本文主要应用的探测手段和资料如下:

1.1 CINRAD/SA 多普勒天气雷达资料

利用的是位于北京市南郊大气探测基地的新一代天气雷达(CINRAD/SA)提供的资料,CINRAD/SA 雷达所在经度 $116^{\circ}18'19''E$,纬度 $39^{\circ}48'32''N$,海拔高度 97.5 m,雷达反射率最大探测距离 460 km,多普勒速度探测的最大距离 230 km,反射率因子产品最高分辨率 1 km。

1.2 FY-2C 卫星资料及云参数产品

利用的是 FY-2C 卫星 TBB 资料及对 FY-2C 卫星资料进行反演获得的云粒子有效半径。

1.3 自动站资料

地面自动雨量站 5 分钟记录一次的雨量资料。

1.4 TP/WVP-3000 微波辐射计及资料

IP/WVP-3000 微波辐射计,提供每分钟的地面气压和环境温度、红外云底温度、积分水汽量、积分液水量和地面至高空 10 km,(1 km 以下间隔 100 m,1 km 以上间隔 250 m),共 47 个高度层的温度、湿度、水汽密度、液态水廓线等资料。本文所用 IP/WVP-3000 微波辐射计所在经度 $116^{\circ}17'25''E$,纬度 $39^{\circ}56'42''N$,海拔高度 75 m,位于北京 CINRSD/SA 多普勒天气雷达站正北方向,距离雷达站约 21.7 km。

为对 IP/WVP-3000 微波辐射计资料进行更好的了解,首先对其探测原理进行简单的介绍,再将其获得的液态水廓线资料与飞机探测获得的进行简单

的比对,以了解其液态水廓线资料的实用性,为其在下面的应用做准备。

1.4.1 TP/WVP-3000 微波辐射计探测原理

TP/WVP-3000 微波辐射计,是利用微波频率范围内 12 个通道的辐射强度来探测水汽、云液态水和氧分子,这 12 个通道分别是 22.035、22.235、23.835、26.235、30.0、51.25、52.28、53.85、54.94、56.66、57.29 和 58.8 GHz。辐射计在 22~30 GHz 内的波束宽度在 5° 左右;在 51~59 GHz 内的波束宽是 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 。

根据基尔霍夫定律,微波在 22.235 GHz(其波长为 1.35 cm)处,对大气分子具有强烈吸收,在 60 GHz 附近,对氧分子具有强烈吸收,并且根据水汽随压力变宽的性质,TP/WVP-3000 辐射计利用 22~30 GHz 频段之间的 5 个通道来反演大气水汽廓线,51~59 GHz 频段之间的 7 个通道来反演温度廓线,液态水廓线则是由 22~59 GHz 范围内的 12 个通道共同计算得到的。

1.4.2 TP/WVP-3000 微波辐射计探测云液态水廓线同飞机观测云液态水廓线的对比

对于辐射计的液态水廓线资料,国内外一些学者也做过许多工作。其中,Solheim 和 Andrew L. Reehorst 等^[12-13]在 AIRS 试验中将辐射计探测的温度、湿度和液态水廓线与其他多种探测资料所获得的相应廓线进行对比,发现辐射计与飞机获得液态水廓线,在降雨量较小情况下,存在较好的对应关系。香港陈伯伟^[14]还就辐射计资料中的温、湿廓线与气球探测的温、湿廓线进行过对比,发现辐射计提供的温、湿廓线与气球探测较为一致。

本节利用飞机垂直探测获得的液态水廓线与 TP/WVP-3000 辐射计进行简单比对,其中,飞机探测的液态水含量是通过飞机云粒子探头探测的粒子谱积分所得。图 1 给出了北京 2005 年 9 月 29 日探测过程中飞机飞行高度随时间的变化,这次降水过程,云状为层积云,从图 1 中可知:飞机 14:49 时起飞,14:55 时爬升到 2500 m 高度后水平飞行,

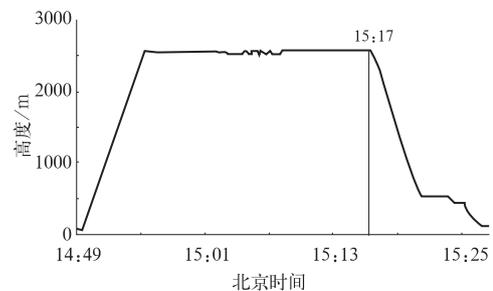


图 1 2005 年 9 月 29 日过程飞机飞行高度随时间的变化
Fig. 1 Variations of the aircraft altitude with time on September 29, 2005

15:17时下落。考虑到辐射计的探测范围,选取飞机下落阶段探测资料与辐射计资料进行比对。

图2a是飞机下落过程探测的液态水廓线,图2b是此时段辐射计获得的任意三条液态水廓线,这一时段,地面小时雨量为1mm。从图2b中可以看到,三条液态水廓线的1000m以下,变化趋势一致,量值也相差不大,1000m高度以上,液态水含量增加迅速,变化趋势较为一致,但量值开始出现差别,2000~2500m高度处,三条廓线都出现液态水

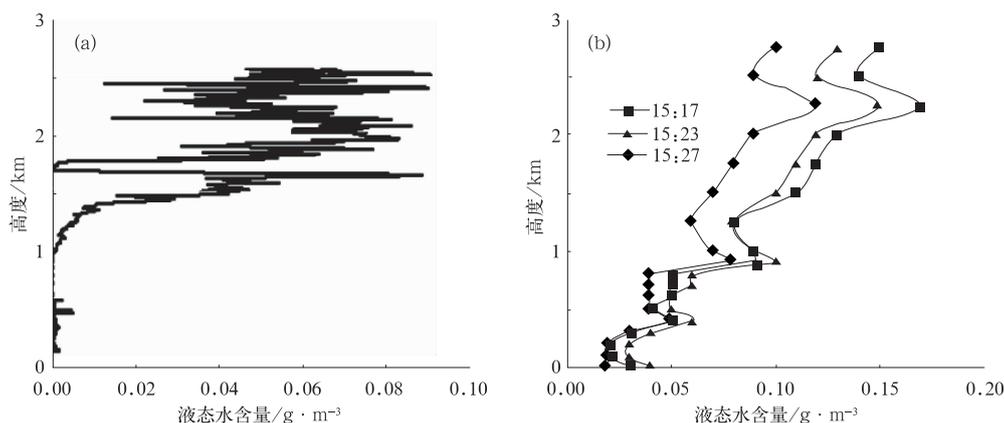


图2 2005年9月29日飞机探测获得的液水廓线(a)和辐射计探测的液水廓线(b)
Fig. 2 Liquid-water profiles detected by plane (a) and that detected by microwave radiometer (b) on September 29, 2005

上体现空中液态水的垂直分布变化趋势。

2 云和降水随时间的演变特征分析

2.1 云系演变

2007年6月30日降水过程,从FY-2C卫星TBB图(图3)观测分析来看:影响北京地区的这次降水过程,是由大片自西南向东北方向移动的降水云系造成的。从云图中看,在云系移动过程中,不断伴随有中小尺度云团的生成、发展、增强、合并、移出等过程。此次降水主要受两个较强云团影响,09:00时,云团A自西南方向随着云系的移动进入北京境内,随着时间的变化,此云团在北京境内不断发展增强;12:00时,A云团发展较强,但随后随着云系的移动渐渐移出北京地区。16:00时,在北京地区的南部,又有一云团B生成;19:00时B云团增强,并与位于北京地区北部的云团合并形成一个较大的云团,覆盖在北京上空,21:00时完全移出北京境地。

2.2 雷达回波演变特征

从当日北京CINRSD/SA雷达站回波演变(图4)来看,10:30时,大片混合云降水回波从雷达站西南方向移近雷达站上空,从速度图来看,此大片

含量峰值。结合飞机探测,飞机探测的液态水廓线在1500m左右,液态水含量迅速增加,1500~2500m之间,液态水含量较大,但量值不是很稳定。

从图2中还可以看出,辐射计探测的廓线中液态水含量值比飞机探测的要大得多,这可能是由于辐射计获得的液态水廓线与飞机探测获得的算法不同有关。但是尽管两者量值差别较大,但若以飞机探测为参照,辐射计获得的液态水廓线虽不能准确提供空中液态水含量的量值,但是还能在一定程度上

降水回波持续向东北方向移动;11:30时,混合云回波中的强对流单体移经辐射计上空,12:00时移出,此后一段时间,辐射计上空没有较强的回波生成或移过;17:30时,雷达站的东北部,较强的对流单体合并形成一条强的降水回波带,回波带受局地气流影响,逆时针旋转;18:30时左右,强回波带移经辐射计上空,20:00时后辐射计区域回波较弱,降水回波逐渐消失。

2.3 云系中云液态水含量和地面降水量随时间的演变

为了研究云系演变过程中,云液态水含量与地面降水量随时间变化之间的关系,图5给出了这次降水过程中辐射计所测云液态水含量及辐射计区域地面自动雨量站5分钟一次的加密雨量随时间的变化情况。

根据雨量站观测,此次过程共出现两个降雨量较大的时段,分别是A 11:30—12:30时段,降水8.2mm,和C 18:30—19:30时段,降水13.5mm。对比辐射计观测资料,A时段,空中云液态水含量如图5中所示,从11:00时开始迅速增大,最大达到18.28mm;C时段,云液态水含量也较大,最大为17.38mm;B时段降水较弱,空中液态水含量值也很小;D时段,

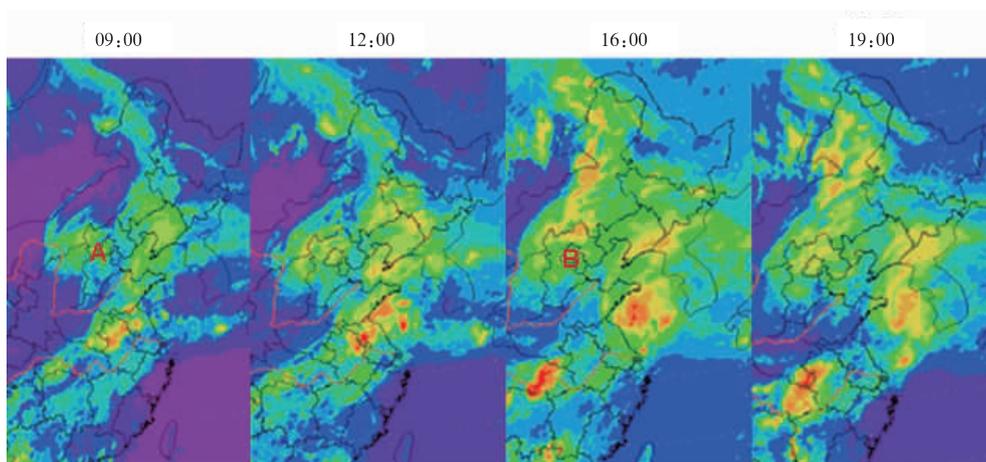


图 3 2007 年 6 月 30 日 FY-2C 卫星 TBB 图
Fig. 3 TBB of FY-2C satellite on June 30, 2007

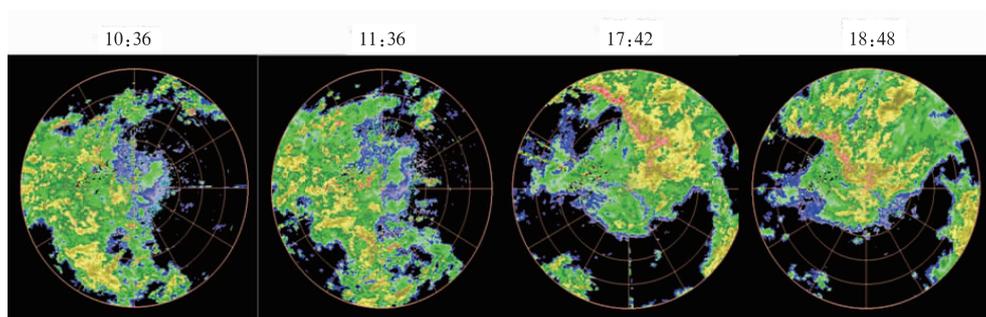


图 4 2007 年 6 月 30 日的雷达回波图
Fig. 4 PPI of radar echoes on June 30, 2007

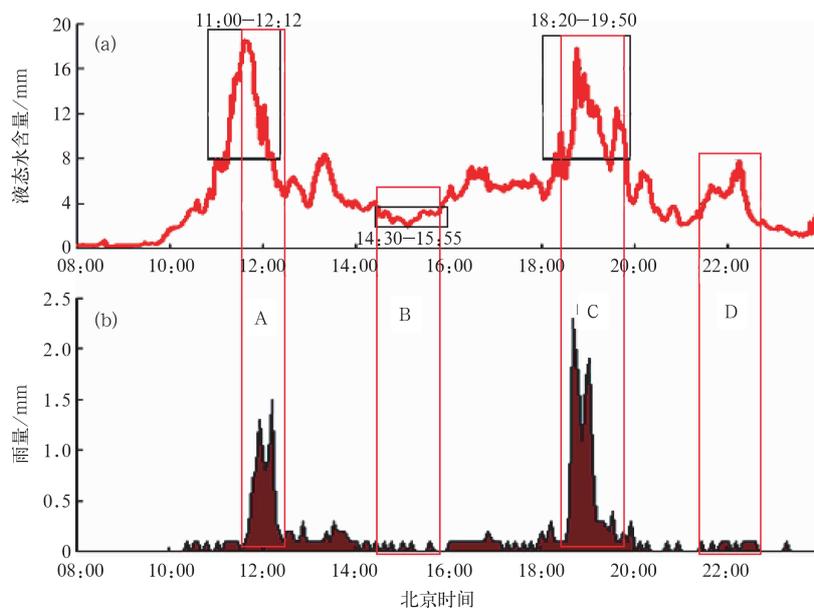


图 5 2007 年 6 月 30 日辐射计所测云液水含量随时间的变化(a),地面雨量随时间的演变(b)
Fig. 5 Variations of cloud liquid water measured by radiometer with time (a) and the evolution of rainfall (b) on June 30, 2007

地面降雨量较小,但空中液态水还存在一定的量值。
根据图 5,地面降水开始前,辐射计探测到空中

云液态水含量明显增加,地面降水的产生或增大滞后于空中云液态水含量的增加。A 时段,空中云液

态水含量迅速增加后约 30 分钟,才开始产生降水, C 时段降雨量增大比同时段空中云液态水含量增加晚约 10 分钟。

由以上分析可见,降水开始前,辐射计探测到空中云液态水含量明显增加,地面降水的产生滞后于空中液态水含量的增加,利用这种现象,可提前预知,在此时段云系正处于降水产生的发展阶段,由此可应用于人工增雨作业条件的识别。总的来说,地面降水与空中云液态水含量随时间分布对应较好,但是在 D 时段,空中云液态水含量保持有一定的较高量值,但地面降水较小,所以降水的产生还可能与液态水在空中的垂直分布等因素有关。

3 云降水垂直结构演变特征及成因分析

3.1 云液水含量的垂直结构特征

通过前面第 1.4.2 节对 TP/WVP-3000 辐射计

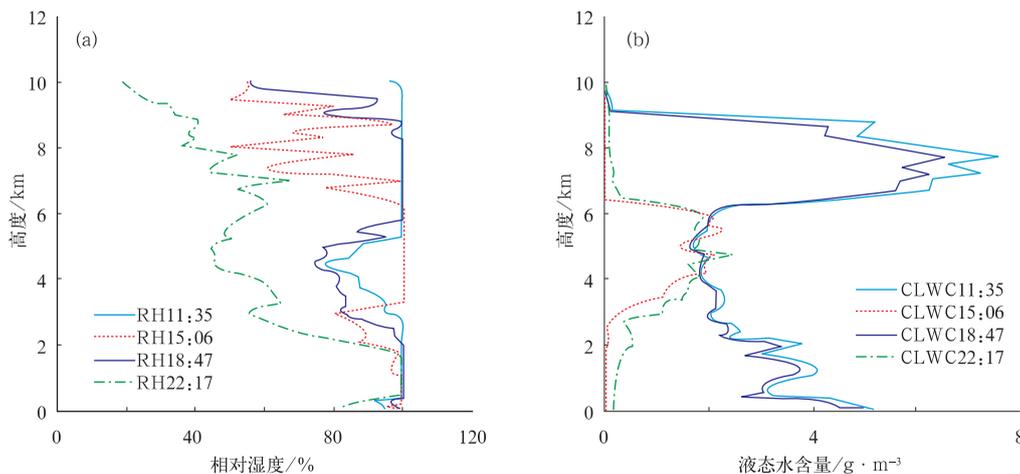


图 6 2007 年 6 月 30 日四时刻相对湿度(a)和云液态水含量(b)的廓线
Fig. 6 The profiles of the relative humidity (a) and cloud liquid water content (b) at the four moments on June 30, 2007

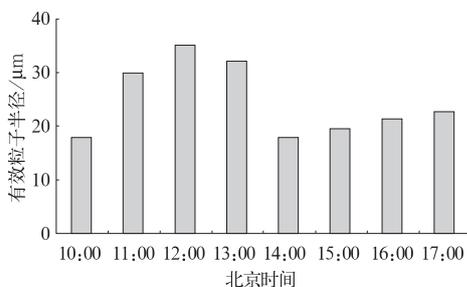


图 7 2007 年 6 月 30 日 FY-2C 卫星资料反演的有效粒子半径
Fig. 7 The retrieval of cloud effective particle radius by FY-2C satellite data on June 30, 2007

空中确实还是存在着一定的液态水分布的,所以可以认为 11:35 和 18:47 两时刻的高层是存在着一定

与飞机液态水垂直廓线进行的对比来看,可以利用该微波辐射计获得的液态水廓线,用于简单的估测空中液态水的垂直分布。

利用辐射计垂直廓线资料,来分析前面提到的降雨较强 A、C 时段及降雨较弱 B、D 时段内的相对湿度与云液态水的垂直分布情况。选取 A、C 时段中液态水含量最大的两时刻,11:35 和 18:47 时,及 B 时段的 15:06 时, D 时段的 22:17 时,四时刻的廓线来进行云降水垂直结构的分析,见图 6。

图 6 是四时刻辐射计遥测的云湿度层结(a)和云液态水含量廓线(b)。从图 6 中可以看出,地面降雨较大的 11:35 和 18:47 两时刻,云液态水垂直廓线变化趋势较为一致。图中显示,这两时刻,在高层都存在着较大的液态水含量,由于在这两时刻,地面降水量比较大,所以辐射计探测的液态水廓线可能存在着一定的误差。为了验证这两时刻较高层是否存在较大的液态水含量,利用卫星资料反演的有效粒子半径随时间的变化(图 7)来看,在 11:35 时,

量的液态水含量。15:06 时和 22:17 时降雨量较小,这两时刻的云液态水廓线显示,在 2500~6500 m 的中空高度有一定量的液态水存在,不同的是在 22:17 时廓线中,低层 2000~4000 m 相对湿度较小(在 80% 以下)。

图 7 是 FY-2C 卫星反演的辐射计区域有效粒子半径随时间的演变,从图中来看,液态水含量大的区域有效粒子半径也较大。

3.2 雷达降水回波垂直廓线与液态水含量垂直廓线

雷达观测的降水回波垂直结构与空中云液态水的垂直分布情况有什么关系吗? 我们选取 A、B、C

时段内几个时刻的同一位置的雷达降水回波垂直廓线与辐射计液态水廓线来进行分析(见图 8, 雷达降水回波垂直廓线为红色线, 辐射计液态水廓线为黑色线)。

图 8 中, 在 A、B、C 三个时段中, A 和 C 的回波垂直分布有个共同特点, 回波顶高都超过 9000 m,

在 6000 m 高度处回波强度达到 20 dBz, 并且从 6000 m 高度处往下, 回波逐渐增强, 4000 m 高度左右达到最强, 约 45 dBz, 低层 2000 m 以下, 回波较强, 并且两时段的强回波都基本上已经接近地面。B 时段, 垂直方向回波整体较弱, 相对较强回波分布在 4000 m 至 5000 m 高度之间, 低层回波值较小。

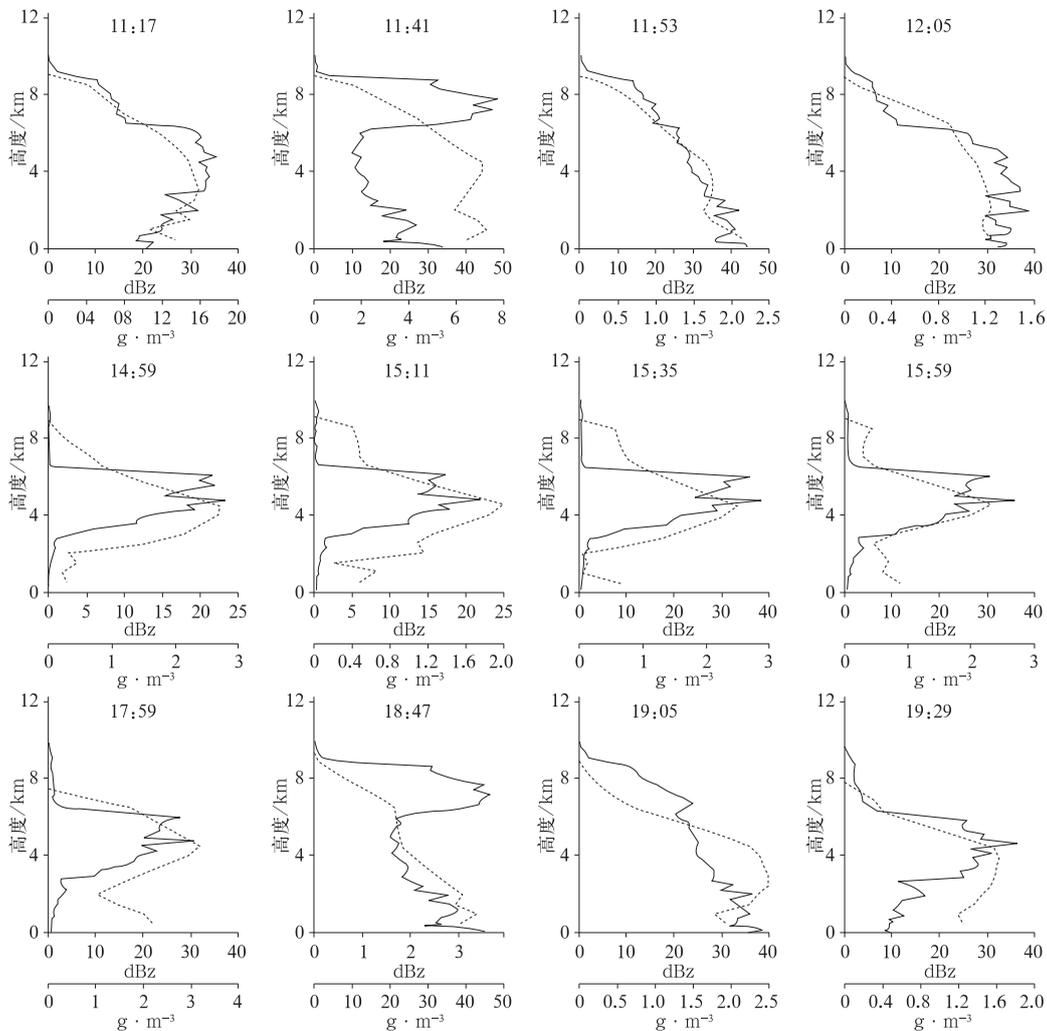


图 8 特征时段内同时刻的雷达垂直廓线(图中虚线)和辐射计液态水垂直廓线(图中实线)分布

(a) 11:00—12:10 A 时段的雷达垂直廓线和辐射计液态水垂直廓线分布

(b) 14:30—16:00 B 时段的雷达垂直廓线和辐射计液态水垂直廓线分布

(c) 18:00—19:50 C 时段的雷达垂直廓线和辐射计液态水垂直廓线分布

Fig. 8 The distribution of the vertical profile of radar reflectivity (dotted lines) and radiometer liquid water (solid lines) at a few times of the specified period

(a) The distribution of the vertical profile of radar reflectivity and radiometer liquid water

during 11:00—12:10 of time period A; (b) The distribution of the vertical profile of radar reflectivity

and radiometer liquid water during 14:30—16:00 of time period B; (c) The distribution of the vertical

profile of radar reflectivity and radiometer liquid water during 18:00—19:50 of time period C

再看与雷达回波垂直廓线同时同位置的辐射计液态水廓线, 可以看出, 除了个别时刻(图中 11:41 和 18:47 时)外, 雷达回波廓线与辐射计液态水廓线存在着较好的垂直分布对应关系。而 11:41 和 18:47 两时刻, 辐射计液态水廓线显示, 液态水含量

在 8000 m 高度左右特别大, 11:41 时达到 $7.76 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 18:47 时为 $3.53 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。前面我们也曾提到, 这两时刻的辐射计液态水廓线可能存在一定的误差。所以总的来说, 同时同位置的雷达回波垂直分布与辐射计液态水的垂直分布有着较好的对应关

系,所以从确定人工增雨作业条件的角度来看,可以加强对雷达降水回波垂直结构的关注来指导作业。

3.3 各高度层上雷达反射率因子和辐射计液态水含量随时间的变化

为了进一步分析整个降水过程中辐射计探测区域上空各个不同高度层雷达反射率和辐射计液态水含量的特征,选取这次过程中辐射计位置上空 2000 m、3000 m、4000 m 和 5000 m 高度层中各个时刻的雷达反射率和辐射计液态水含量,来观察它们随时间的变化情况,如图 9 和图 10 所示。

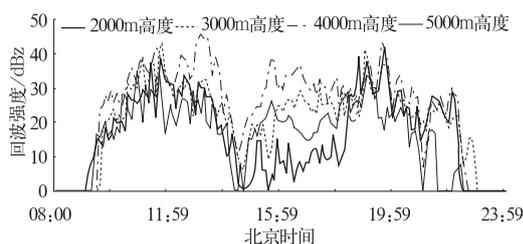


图9 辐射计区域各高度层雷达反射率随时间的变化(其中分别为 2000 m、3000 m、4000 m、5000 m 高度层)

Fig. 9 The evolution of radar reflectivity with time at different height levels of 2000 m, 3000 m, 4000 m, and 5000 m in the microwave radiometer region

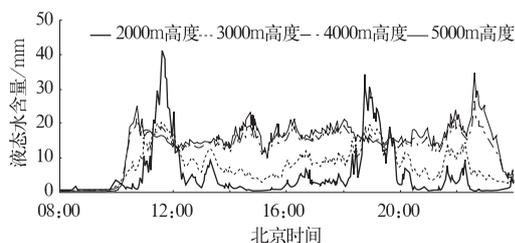


图10 各高度层辐射计液态水含量随时间的变化(其中分别为 2000 m、3000 m、4000 m、5000 m 高度层)

Fig. 10 The evolution of radiometer liquid water content with time at different height levels of 2000 m, 3000 m, 4000 m, and 5000 m

图 9 随着降水回波的移近,从 09:53 时开始,各高度层的降水回波逐渐增强,其中 4000 m 高度层回波增强最快;10:30—12:10 和 18:30—20:00 两时段,四个高度层回波都较强,有利于降水的产生;12:10—18:30,相对四个高度层而言,4000 m 高度层回波最强,其他高度层回波较弱,特别是 2000 m 高度层回波最弱,不利于降水的形成。图 10,4000 m 和 5000 m 高度层液态水含量较丰富且随时间分布均匀,2000 m 和 3000 m 高度层,在 10:30—14:00 和 18:30—20:00 两时段存在着非常丰沛的液态水分布,所以由图 10 可以明显地看出,低层液态水含量丰富,与地面降雨的产生有着直接的关系。

4 小结和讨论

通过对 2007 年 6 月 30 日降水过程的卫星、雷达、微波辐射计等观测资料的综合分析表明:

(1) 降水开始前,辐射计探测空中云液态水含量明显增加,地面降水的产生滞后于空中液态水含量的增加,利用这种现象,可提前预知,在此时段云系正处于降水产生的发展阶段,由此可应用于人工增雨作业条件识别。

(2) 在相同时间对同一位置进行探测的雷达和辐射计资料显示,雷达回波垂直分布趋势与辐射计液态水的垂直分布趋势有着较好的对应关系。

(3) 空中液态水的分布,特别是低层液态水的分布,与地面降雨的产生有着直接的关系。

致谢:感谢北京市人工影响天气办公室提供的微波辐射计等资料。

参考文献

- [1] 齐彦斌,郭学良,金德镇. 一次东北冷涡中对流云带的宏微物理结构探测研究[J]. 大气科学,2007,31(4):621-634.
- [2] 吴兑. 宁夏 5-8 月降水性层状云的宏观特征[J]. 高原气象,1987,6(2):169-175.
- [3] 苏爱芳,周毓荃,吴臻,等. 一次典型降水层状云的结构特征和增雨潜势分析[J]. 气象与环境科学,2007,30(1):58-65.
- [4] 彭亮,姚展予,戴进,等. 河南春季一次云降水过程的宏微物理特征分析[J]. 气象,2007,33(5):3-11.
- [5] 金华,王广河,游来光,等. 河南春季一次层状云降水过程云物理结构分析[J]. 气象,2006,32(10):3-10.
- [6] 游来光,吴兑. 层状云中的液水含量与降水条件[J]. 气象,1981,7(3):20-21.
- [7] 雷恒池,魏重,沈志来,等. 微波辐射计探测降雨前水汽和云液水[J]. 应用气象学报,2001,12(增刊):73-79.
- [8] 黄容,程明虎,崔哲虎,等. 用云和辐射传输模式研究对流性降水云微物理及辐射特性[J]. 气象,2004,30(3):7-11.
- [9] 李铁林,刘金华,刘艳华,等. 利用双频微波辐射计测空中水汽和云液水含量的个例分析[J]. 气象,2007,33(12):62-69.
- [10] 梁谷,李燕,岳治国,等. 地基微波辐射计探测空中水个例分析[J]. 陕西气象,2005,(1):23-25.
- [11] 娄淑娟,张蕃,张磊. 微波辐射计降水个例的初步分析[G]. 2006,中国气象学会 2006 年年会“人工影响天气技术专业研讨会”分会场文集:88-92.
- [12] 周毓荃,陈英英,李娟,等. 用 FY-2C/D 卫星等综合观测资料反演支物理特性产品及检验[J]. 气象,2008,34(12):27-35.
- [13] Solheim F J, Godwin E, Westwater Y, et al. Radiometric Profiling of Temperature, Water Vapor, and Liquid Water Using Various Inversion Methods [J]. Radio Sci, 1998, 33: 393-404.
- [14] Andrew L Reehorst. Comparison of Profiling Microwave Radiometer, Aircraft, and Radiosonde Measurements From the Alliance Icing Research Study (AIRS).
- [15] 陈柏伟. 多波长微波辐射计在降雨临近预报的表现与应用[R]. 第十九届粤港澳气象科技研讨会,2005.