杨文霞,范皓,杨洋,等,2019. 一次层状云降雨过程多源遥感特征参量演变分析[J]. 气象,45(9):1278-1287. Yang W X, Fan H, Yang Y, et al, 2019. Evolution analysis of physical quantities obtained by multi-source remote sensing in a process of stratiform cloud rainfall[J]. Meteor Mon,45(9):1278-1287(in Chinese).

## 一次层状云降雨过程多源遥感特征参量演变分析\*

杨文霞<sup>1,2</sup> 范 皓<sup>3</sup> 杨 洋<sup>1,2</sup> 赵利伟<sup>1,2</sup>

1 河北省人工影响天气办公室,石家庄 050021
2 河北省气象与生态环境重点实验室,石家庄 050021
3 河北省邢台市气象局,邢台 054000

提要:利用河北省邢台市皇寺国家观测站布设的 Ka 波段云雷达、微波辐射计和微雨雷达以及地面雨量计等观测资料,对2017年5月3日一次西南涡天气过程的降水云系进行了综合分析,结果表明:本次降水过程为稳定性层状云过程,云内粒子下落速度由高空向地面逐渐增大,第一轮降水出现在云的发展阶段,第二轮降水出现在云的成熟阶段,每次降水开始前云内的相对湿度、水汽含量、液态水含量和温度曲线同时出现跃增和峰值,各指标在降水结束后出现较明显下降,之后得到恢复,出现第二三次峰值并产生降水;利用微波辐射计资料在时间和空间上连续反演计算云中水汽压和冰面饱和水汽压差值场("e-E<sub>i</sub>"差值场),当云中过冷水和过冷水汽大值区与"e-E<sub>i</sub>"差值场的正值区重合时,冷云中贝吉龙过程较强,有利于精细化定量判断强降水出现和人工增雨潜力区位置,综合以上遥感探测资料分析结果,可以认为本次天气过程有利的人工增雨作业时机出现两次,第一次在13:45降水刚刚开始至云顶下降到6km前;第二次时间较长,云层条件更为有利,即17:40-21:15云顶高度维持在8~10km的时段;作业适宜高度为4~8km(-20~0℃)。

关键词:层状云,特征参量,演变

**中图分类号:** P412, P458 文献标志码: A **DOI**: 10.7519/j. issn. 1000-0526. 2019. 09. 008

## Evolution Analysis of Physical Quantities Obtained by Multi-Source Remote Sensing in a Process of Stratiform Cloud Rainfall

YANG Wenxia<sup>1,2</sup> FAN Hao<sup>3</sup> YANG Yang<sup>1,2</sup> ZHAO Liwei<sup>1,2</sup>

1 Weather Modification Office of Hebei Province, Shijiazhuang 050021

2 Hebei Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment, Shijiazhuang 050021

3 Xingtai Weather Office of Hebei Province, Xingtai 054000

Abstract: In this paper, the precipitation cloud system of southwest vortex weather on 3 May 2017 was analyzed based on the observation data of Ka-band cloud radar, microwave radiometer and micro rain radar at Huangsi National Observation Station in Xingtai, Hebei Province. The results showed that this precipitation process was a stable stratiform cloud process. And the falling speed of particles in the cloud gradually increased from high level to low level. The precipitation first appeared in the developing stage of cloud, and then in the mature stage of cloud. The curves of relative humidity, water vapor content, liquid water content and temperature in the cloud appeared to jump and peak at the same time before raining every time. All the indicators obviously declined after the end of precipitation, then recovered and rose to the second

2018年3月27日收稿; 2019年7月19日收修定稿

第一作者:杨文霞,主要从事云物理学研究.Email:ywx418@163.com

<sup>\*</sup> 河北省科技计划支撑项目(17227001D和14227003D)、国家自然科学基金项目(41475121)和太行山东麓人工增雨防雹作业技术试验示范 项目(HBRYWCSY)共同资助

and third peaks with precipitation. The microwave radiometer data were continuously used to retrieve "cloud vapor pressure and ice-saturated vapor pressure difference  $(e-E_i)$ " in time and space. When the supercooled water and the large-value area of supercooled water vapor in the cloud coincides with the positive area of  $e-E_i$ , the Bergeron process is relatively strong in cold clouds, which is helpful to quantitatively determine the location of heavy precipitation and the potential area for artificial precipitation. Based on the data of cloud radar, microwave radiometer and micro rain-radar, we think that there were two chances for weather modification operation during the rainfall process of this time. The first chance was from 13:45 BT to the time when the cloud top dropped to 6 km, and the second was longer, and the cloud condition was more favorable for operation. That was the period from 17:40 BT to 21:15 BT when the cloud top height was maintained at the 8-10 km height. What's more, the suitable working height was from 4 km to 8 km (-20-0°C).

Key words: stratiform clouds, physical quantities, evolution

## 引 言

20世纪80年代我国引入机载云粒子探测系统 系列仪器(PMS),促进了云微物理观测研究的发 展,但是 PMS 探测资料只能由飞机携带入云观测, 有一定局限性,而地基遥感探测是弥补其局限性的 重要手段。云(毫米波)雷达由于波长短,对小云滴 的探测更灵敏,一般应用于对云的微观结构的探测, 是探测非降水云和弱降水云的有效工具(宗蓉, 2014),国际上云雷达在气象上的应用开始于 20 世 纪 60 年代(Paulsen et al, 1970), 到 80 年代, 云雷达 在技术上得到快速发展(Hobbs and Funk, 1984; Hobbs et al,1985),云雷达在我国应用于气象领域 的观测最早始于 1979 年(魏重等,1985),近年来随 着对云探测要求的不断提高,毫米波雷达的研发得 到较快发展(仲凌志等,2011;赵静等,2016);地基微 波辐射计可以对某一观测点上空的云系进行连续不 间断观测(钟剑等,2010),而且体积小,操作简单,90 年代开始就在人工影响天气工作中得到广泛应用 (朱元竞等,1994;李万彪等,2001),但微波辐射计 探测降水发生时的温度、湿度探测等数据均有偏差, 使其应用受到限制;微雨雷达原理是以雨滴大小和 散射截面、雨滴大小和下降速率的关系为基础判断 降雨状况,测量的雨滴粒径范围为 0.109~6 mm, 微雨雷达资料弥补了对降水粒子自云的下层至地面 的增长过程观测,但现阶段我国云雷达和微雨雷达 在气象研究中的应用还较少。

2017年5月3日受西南涡天气过程影响,河北

省邢台市皇寺国家观测站上空出现弱的层状云降水 过程,位于此观测站的 Ka 波段(毫米波)云雷达、微 波辐射计、微雨雷达和地面雨量计对本次过程的层 状云系进行了连续观测,获取到多源地基遥感资料, 近年来随着"十三五"规划的落实,多源地基遥感设 备在河北省的布置逐渐增加,急需加强这方面的应 用研究。

### 1 天气过程和观测设备

图 1 为本次天气过程的地面和高空天气系统移动情况,地面辐合线于 2017 年 5 月 3 日 08 时移动 到河北省西南角,14 时左右位于邢台市皇寺观测站 附近,500 hPa 槽线落后于地面辐合线,20 时后移过 河北省,天气系统及云带移动方向为西南一东北,表 1 为本次地基遥感观测设备的主要指标和性能。

#### 2 降雨过程

为了分析这次过程,使用位于河北省石家庄市 的多普勒天气雷达组合反射率图,分析整个过程的 范围、移动和演变情况,如图 2 所示,2017 年 5 月 3 日 12 时河北省南部邯郸市出现小块降水回波,回波 强中心组合反射率达到 45 dBz,13 时起,降水回波 面积逐渐扩大,并自西南向东北移动,大范围片状回 波中嵌有多个 40 dBz 的强中心,13 时左右邢台站 开始出现 25 dBz 的回波,14 时左右邢台站位于强 降水中心边缘,15 时邢台站处于降水回波的缝隙, 16—17 时邢台站上空的降水回波逐渐发展,19 时后





Fig. 1 Moving path of (a) surface convergence line (dotted line), (b) 500 hPa trough (thin line) and 850 hPa vortex at high altitude (letter D) in southwest vortex weather process on 3 May 2017 (The arrows stand for the moving divection of the system)

表 1	地基遥感观测设备的主要指标和性能
-----	------------------

Table 1 Main indicators and performances of ground based remote sensing observation equipments							
名称型号	频率/波长	探测高度	时间分辨率	空间分辨率	探测产品		
多普勒天气雷达 CINRAD/SA (北京敏视达)	2880 MHz, 10 cm	21 km	6 min	反射率:1 km,速度 和谱宽:250 m	基本反射率、径向速 度、谱宽,导出产品大 于 70 种		
云雷达 (西安华腾)	Ka 波段 35 GHz, 8.5 mm	0.2~15 km	1 min	30 m	反射率、径向速度、速 度谱宽等,云底、云顶 高度,垂直廓线,云水 含量		
微雨雷达(MRR2, 德国 METEK 公司)	24.23 GHz, 1.2 cm	100~3100 m	10~3600 s	10~200 m 可调	反射率因子、雨强、液 态水含量、下落速度、 雨滴谱等		
微波辐射计 (中国兵器工业 第 206 研究所)	_	0~10 km	5 min	0∼500 m: 50 m, 0.5~2 km: 100 m, 2~10 km: 250 m	温度、湿度、水汽、液态 水廓线		

注:邢台市皇寺国家观测站坐标:37°11′N、114°22′E,海拔高度为183 m。

Note: The coordinate of Huangsi National Observation Station in Xingtai, 37°11'N, 114°22'E; elevation; 183 m.

邢台站位于大片降水回波中,回波开始自西北向东 南移动,21时左右大片降水回波移出邢台站。

从图 3 的过程累积降水量可见,整个过程降水 量自西北向东南呈增大趋势,邢台站的过程降水量 在 1~10 mm。图 4 为本次西南涡天气过程邢台站 地面雨量计降水资料,本站降水时段为 13:45— 21:00,与高空和地面天气系统移过观测站的时间段 相一致,最大小时降水量为 1.3 mm,最大 5 min 降 水量为 0.2 mm,属于较弱降水过程,采用云雷达观 测失真较小。

邢台站主要降水时段分为3次:13:45—14:00、 15:40—15:45、17:40—21:00,第一次降水结束后, 邢台站上空降水回波减弱,降水中心位于邢台的东 部区域,15时邢台站处于降水回波的缝隙,之后本 站上空降水回波逐渐发展,17:40 后邢台站上空出 现较强降水回波,21 时后降水回波逐渐移出本站。

3 遥感观测设备产品及计算方法

#### 3.1 Ka波段(毫米波)云雷达观测资料及产品

本次过程采用西安华腾公司生产的 Ka 波段双 偏振多普勒雷达,其工作波长为 8.5 mm,可探测直 径几微米的云粒子到弱降水粒子,是目前探测云重 要的遥感手段。毫米波测云雷达除了能够连续观测 云厚、云高、云量等宏观参数外,还可以获得云内微 物理参量,如云粒子的大小、浓度、滴谱分布与液态 水含量等(Uttal et al,1995),其主要技术指标见



图 2 2017 年 5 月 3 日 12—21 时冀中南地区多普勒天气雷达回波强度水平演变 Fig. 2 Horizontal change of Doppler radar echo intensity in southern-central Hebei Province from 12:00 BT to 21:00 BT 3 May 2017



图 3 2017 年 5 月 3 日 08 时至 4 日 08 时 冀中南地区自动雨量站观测的 24 h 累积雨量(单位:mm) (黑点为邢台地区人工观测站) Fig. 3 The 24 h cumulative rainfall obtained by registering rain gauge in southern-central Hebei Province from 08:00 BT 3 to 08:00 BT 4 May 2017 (unit:mm) (Black dots stand for the manual observation stations in Xingtai Region)



图 4 2017 年 5 月 3 日皇寺国家观测站 逐 5 min(a)和逐小时(b)地面雨量 Fig. 4 Every-5-min (a) and hourly (b) ground rainfall measured at Huangsi National Observation Station on 3 May 2017

表 1,直接探测产品包括回波强度、径向速度、速度 谱宽,液态水含量采用 W-Z 关系法:

(1) 假设云滴谱分布符合对数正态分布

$$LWC = \left(\frac{\pi}{6}\right) \rho N_0^{0.5} \exp(-4.5\sigma^2) Z^{1/2}$$

式中,*LWC* 为液态水含量(单位:g・m<sup>-3</sup>),*Z* 为雷 达反射率(单位:mm<sup>6</sup>・m<sup>-3</sup>), $\rho$  为水密度(单位:kg •m<sup>-3</sup>), $N_0$  为粒子浓度(单位:个・m<sup>-3</sup>), $\sigma$  为谱宽 参数。

(2) 假设云滴谱符合伽玛分布,即 Z =
A (β+6)/b<sup>(β+7)</sup>,则

$$LWC = \frac{\pi \rho A}{6} \frac{(\beta + 3)}{b^{(\beta+4)}}$$

式中,A、b和β为常数。

由于毫米波波长短的特性,尺度较大的雨滴对 毫米波衰减严重,但是冰晶和雪不影响毫米波探测 (Moran et al,1998),毫米波雷达的另一个优点是基 本不受地物杂波和晴空回波干扰(Miller et al, 1997),已有的研究中认为-17 dBz 是降水粒子出 现的最低反射率(Frisch et al,1995;Kollias et al, 2007),Fox and Illingworth(1997a;1997b)利用毫 米波雷达观测发展成熟的含降水粒子的层积云,发 现反射率的最大值出现在云底,Frisch et al(1995) 将 0.7 m • s<sup>-1</sup>作为云滴和降水粒子下落速度的分 界;本文将采用以上指标对获取的云雷达资料进行 分析,图 5 为本次降水过程的云雷达观测的时间-高 度图,产品包括反射率因子、液态水含量、多普勒速 度和速度谱宽 4 种。

#### 3.2 微波辐射计观测资料及产品

本次过程微波辐射观测资料如图 6 所示,可获 取的产品包括水汽含量、液态水含量、相对湿度和温 度,利用温度和湿度反演出"云中水汽压(e)和冰面 饱和水汽压(E<sub>i</sub>)差值场",利用该差值场计算出云内 的过饱和度(简称"e-E<sub>i</sub>"差值场,单位:hPa)。根据 贝吉龙-芬德生(Bergeron-Findeison)冷云降水学 说,冰面过饱和度(e-E<sub>i</sub>)对冷云降水具有重要意 义,若冰面过饱和度为正值,则冷云中贝吉龙过程较 强有利于降水的产生,考虑到有降水时微波辐射计 温度和湿度资料有偏差,因此需结合其他产品综合



from 09:30 BT to 11:30 BT 3 May 2017

(a) radar reflectivity factor, (b) liquid water content, (c) particle velocity in cloud,

(d) velocity spectrum width



 $E_i$  (saturated vapor pressure on ice) inversion

识别弱降水过程的云内精细结构。

#### 3.3 微雨雷达观测资料分析

如图 7 所示,微雨雷达首先观测回波强度功率 谱,然后计算得到回波强度、雨滴谱、含水量等产品, 其中忽略了空气上升速度,获取的主要产品包括雷 达反射率、液态水含量、雨强、降水粒子下落速率和 雨滴谱垂直分布廓线,由于微雨雷达是短波雷达,反 射率采用以下计算公式:

$$Z=\int_0^\infty N(D)D^6\,\mathrm{d}D$$

式中,N(D)为雨滴浓度(单位:个•m<sup>-3</sup>),D为雨滴 直径(单位:mm)。

液态水含量由单位立体空间内水滴的体积乘以 密度计算得出,与水滴尺寸的三次方成正比:

$$LWC = \rho_{\rm w} \, \frac{\pi}{6} \int_0^\infty N(D) D^3 \, \mathrm{d}D$$

式中, pw 为水密度(单位:kg • m<sup>-3</sup>)。

雨强的计算公式如下:

$$RR = \frac{\pi}{6} \int_0^\infty N(D) D^3 v(D) dD$$

式中,v(D)为雨滴下落末速度(单位: $\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1}$ ),其他 变量同上式。

雨滴下落径向速度采用风廓线雷达常用方法, 由多普勒频移确定:

$$W = \frac{\lambda}{2} \int_{0}^{\infty} \eta(f) f \mathrm{d}f \Big/ \int_{0}^{\infty} \eta(f) \mathrm{d}f$$

式中,η(f)为多普勒频移(单位:Hz),f 为频率(单 位:Hz),λ 为波长(单位:m)。

MRR 微雨雷达雨滴谱反演公式为:

$$N(D,i) = \frac{\eta(D,i)}{\sigma(D)}$$

式中, σ(D) 为单个粒子的后向散射面积。

$$\eta(D,i) = \eta(v,i) \, \frac{\partial v}{\partial D}$$

式中,v为速度,D为直径, $\eta(v,i) = \eta(n,i)/\Delta v$ ,  $\eta(n,i) = \log^{-1} \left[ \frac{F(n,i)}{10} \right]$ ,F(n,i)为回波强度功率 谱。





(a) radar reflectivity, (b) liquid water content, (c) rain intensity, (d) falling velocity,(f) raindrop spectrum at different height

### 4 降雨过程特征参量演变

## 4.1 回波强度及降水粒子落速随高度和时间的变化

多普勒天气雷达、云雷达和微雨雷达由于波长 不同,分别适用于测量不同尺度的粒子,近年来对云 雷达观测数据的应用研究较多(李思腾等,2015;赵 静等,2017),这些研究结论验证了云雷达对云粒子 观测的可靠性和与其他探测设备观测的一致性,对 微雨雷达数据的应用研究还比较少见,由微雨雷达 的测量原理可知,微雨雷达对3 km 以下降雨粒子 的测量更为准确,综合利用云雷达和微雨雷达分析 本个例回波强度及降水粒子落速随高度和时间的演 变。

由图 5a 和图 7a 可见,5 月 3 日 09:30 皇寺观测 站上空 4~10 km 开始出现-14~2 dBz 的中云, 10:30 左右云中开始出现 24 dBz 的回波中心,云底 不断向下延伸,11:50 左右云雷达探测到短时间接 近地面回波,相应的微雨雷达在 3 km 附近回波强 度达到 11 dBz, 3 dBz 回波强度仅延伸到 1 km 附 近,说明此时未产生有效地面降水;之后云底抬升, 12:30 左右,云体回波再次发展加强,到13 时云中 开始出现 0℃层亮带,亮带位于 2.5 km,与 13:45-14:00 第一次降水相对应,0℃层亮带以上回波强度 达到 18 dBz,以下达到 35 dBz;降水后云中雷达回 波强度明显减弱,0℃层亮带以上为2 dBz,以下最 大接地回波强度为 3 dBz, 与 15:40-15:45 第二次 降雨相对应的是,云顶位于6 km 附近,0℃层亮带 回波强度为 2~10 dBz,以下为 27 dBz;16 时后,云 顶增长到 10 km 附近,云的中高层有干层,17:40 开 始,云内回波强度逐渐加强,干层消失,17:40-21:00 0℃ 层亮带以上到 6 km 左右出现大面积 10 dBz 的回波强度区,0℃层亮带以下到地面回波 强度范围为 11~35 dBz;地面有降水时微雨雷达反 射率大于 19 dBz。

图 5c 为云雷达观测到的云内粒子速度,图 7d 为微雨雷达观测到的雨滴下落速度,云雷达目前没 有提供这个产品,根据欧洲细网格客观分析资料,5 月 3 日 08 时邢台站环境最大上升速度在700 hPa, 为 0.7 Pa • s<sup>-1</sup>(约 0.07 m • s<sup>-1</sup>),20 时最大上升速 度在 400 hPa,为 1.4 Pa • s<sup>-1</sup>(约0.14 m • s<sup>-1</sup>),因 此当云雷达观测到的粒子下落速度为 1.07 m • s<sup>-1</sup> 时,可判定云内有降水粒子出现;综合分析表明, 09:30 皇寺国家观测站上空 6~7.5 km 已经出现降 水粒子,11:50 左右降水粒子下落到 0℃层亮带附近 就消失,之后大部分时间云内 0℃层亮带以上都含 有降水粒子,落速为 1~2 m • s<sup>-1</sup>,6~9 km 粒子下 落速度为 1 m • s<sup>-1</sup>,是降水粒子生成层;2.5~6 km 粒子下落速度为 2 m • s<sup>-1</sup>,说明云内降水粒子较 小,粒子落速均匀;但是只有 当微雨雷达观测到 2.5 km 到地面之间雨滴落速达到 5~8 m • s<sup>-1</sup>时, 雨量计才观测到有效降水产生;0℃层亮带以下由于 冰粒子融化后碰并作用增强,雨滴落速增加很快,云 雷达观测到的速度谱宽显著增加,说明有大滴出现。

本次个例微雨雷达雨滴谱产品为 13:45-21:00 降雨时段的平均谱(图 7e),平均谱随高度变 化显示,2500 m 高度大、小雨滴共存,有三个较明显 谱密度峰值分别出现在雨滴直径 0.4、2.6 和 4.6 mm 处,峰值分别为 10<sup>9</sup>、10 和 10<sup>-1</sup>个 · m<sup>-3</sup> · mm<sup>-1</sup>;2000 m 高度小于 1 mm 的雨滴谱密度峰值 减小为  $5 \times 10^{6}$  个 • m<sup>-3</sup> • mm<sup>-1</sup>, 0. 5~4 mm 的谱 密度有所增加,位于  $10^{-2} \sim 10^5$  个 • m<sup>-3</sup> • mm<sup>-1</sup>, 说明下落过程中小滴被碰并增长,中滴增加;500~ 1500 m 谱密度曲线为单峰或双峰型,小于 0.5 mm 的小雨滴峰值位于 10<sup>6</sup> 个 • m<sup>-3</sup> • mm<sup>-1</sup>, 1.5 mm 附近谱密度峰值位于  $10^6$  个 • m<sup>-3</sup> • mm<sup>-1</sup>附近,雨 滴直径最大值为 4~4.6 mm;100 m 高度谱密度曲 线呈三峰分布,雨滴直径为 0.5、1.5 和 2.6 mm 对 应的谱密度峰值分别为  $10^5$ 、 $10^4$  和  $10^2$  个 • m<sup>-3</sup> • mm<sup>-1</sup>,雨滴最大直径为5 mm;雨滴谱密度随高度 变化可见,0℃层亮带中大、小滴共存,谱宽度较宽; 随着下落中大滴破碎,小滴碰并增长,雨滴谱谱宽变 窄,小滴谱密度减少3~4个量级,0.5~4 mm 中滴 谱密度增加较快,近地面层时中滴密度增加较快, 1.5和 2.6 mm 直径处出现两个较小的峰值;本次个 例雨滴碰并增长作用不是太典型。

# 4.2 液态水含量、水汽含量、湿度和温度随高度和时间的变化

图 5b 和图 6b 分别为云雷达和微波辐射计的云 液态水含量产品,两种产品的测量结果比较一致,云 液态水含量的范围为 0.05~0.5 g•m<sup>-3</sup>,对比结果 说明本个例微波辐射计产品在有降水时失真较小, 并且微波辐射计的空间分辨率较高,能反演出云内 液态水含量的详细结构,因此本个例更适宜采用微 波辐射计资料分析云内的上述特征量演变。

微波辐射计资料分析显示,相对湿度(图 6c)于 08 时左右在 1~4 km 高度开始由 67%增加到 78%,与云雷达出现单层冷云的时间相应,水汽含量 于 12 时左右出现较明显增加,13:45 第一次降水开 始前相对湿度、水汽含量、液态水含量和温度曲线同 时出现跃增和峰值,液态水含量在 4~6 km 和 2 km 分别出现大于 0.45 g·m<sup>-3</sup>的大值中心,温度场显 示 0℃层位于 3 km 附近," $e-E_i$ "差值场(图 6e)于 12—14 时在 5 km 高度以下出现正值区,表明此时 冷云中温度场有利于贝吉龙过程的冰水转化;云中 各指标在第一次降水结束后出现较明显下降。

15 时后各指标再次出现两次峰值,第二次峰值 除液态水含量最大值较低外,其他指标与第三次峰 值相当;" $e-E_i$ "差值场显示,15 时左右云位于负值 区域,5~7 km高度内" $e-E_i$ "差值场有正值为1的 区域,不利于冷云降水过程的发生发展,因而所对应 的地面降水也为0 mm;15:40 以后,4~5 km高度 范围内" $e-E_i$ "差值场有正值为0~0.5 hPa 的区域 存在,虽然云顶高度较低,15:40—15:45 出现微弱 地面降水;17—20 时的" $e-E_i$ "差值场显示,4.3~ 7.3 km高度内出现大范围0~0.5 hPa 正值区,表 明冷云区温度场有利于贝吉龙过程,因而出现本次 过程的最大地面小时降水量。

以上分析表明,降水开始前,水汽、液态水和温 度曲线会出现跃增,降水发生后上述指标会由于能 量释放而下降,如果各项指标能够快速恢复,降水过 程会持续,整个降水过程中冷云区温度曲线为向上 的弓型,明显高于非降水期间,当冷云中过冷水和过 冷水汽含量大值区与"*e*-*E*<sub>i</sub>"差值场的正值区相重 合时,往往对应着降水中心的出现,重合区的冷云区 也是人工增雨作业的潜力区,由于降水发生时,微波 辐射计给出的温度和湿度有偏差,要结合其他指标 综合使用。

图 7b 中 2.5 km 融化层亮带具有如下特征,微雨雷达反演的液态水含量和雨强在融化层亮带 2.5 km 高度出现大值中心,出现的时间分别为 13:30—14:00 和 18:00—20:00,液态水含量的两次 大值中心值分别为 43 和 50 g • m<sup>-3</sup>,雨强的两次大值中心值分别为 4 和 8 mm • h<sup>-1</sup>,分别对应 13:45—14:00 和 17:40—21:00 的两次有效地面降

水,15:40—15:45 地面出现 0.1 mm 的有效弱降 水,没有观测到大值中心;地面有降水时 2.5 km 高 度到地面的各项物理量比较均匀,2 km 高度到地面 的雨强为1 mm  $\cdot$  h<sup>-1</sup>,因此融化层亮带是否出现液 态水含量和雨强的大值中心,对地面产生较强降水 有一定指标作用。

综合以上三种遥感探测资料分析结果,按照孙 晶等(2015)提出的人工增雨作业条件,可以认为本 次天气过程有利的人工增雨作业时机出现两次,第 一次在 13:45 降水刚刚开始至云顶下降到 6 km 前;第二次时间较长,云层条件更为有利,即17:40— 21:15 云顶高度维持在 8~10 km 的时段;作业适宜 高度为 4~8 km(-20~0℃)。

#### 5 结 论

本文使用 Ka 波段(毫米波)云雷达、微波辐射 计、微雨雷达和地面雨量计对河北省邢台站出现的 一次西南涡弱层状云降水过程进行综合遥感分析, 结果表明云雷达、微波辐射计和微雨雷达联合观测 能获取更为精细的云结构演变和降水粒子增长过 程,是精细化识别降水出现和人工增雨潜力区的有 效手段,主要结论如下:

(1)本次降水过程为稳定性层状云过程,云内 粒子下落速度由高空向地面逐渐增大,6~9 km 粒 子下落速度为1 m・s<sup>-1</sup>,是降水粒子生成层;2~ 6 km下落速度为2 m・s<sup>-1</sup>,粒子较小并且落速均 匀,0℃层亮带以下由于冰粒子融化后碰并作用增 强,雨滴落速增加很快,速度谱宽显著增加,说明有 大滴出现,微雨雷达雨滴谱平均值随高度变化显示, 0℃层亮带中大、小滴共存,谱宽度较宽;随着下落中 大滴破碎,小滴碰并增长,雨滴谱谱宽变窄,小滴谱 密度减少 3~4 个量级,0.5~4 mm 中滴谱密度增 加较快,近地面层时中滴密度增加较快,1.5 和 2.6 mm 直径处出现两个较小的峰值。

(2) 第一段降水出现在云的发展阶段,降水前 冷、暖云内含水量积累达到过程的峰值,2.5~ 8.5 km 高度含水量为 0.5 g • m<sup>-3</sup>,降水产生后云 顶明显下降到 6 km 左右,云内含水量也显著下降; 第二段降水出现在云的持续阶段,云顶高度维持在 8~10 km,云内夹层消失,云内中、低层液态水含量 较高,液态水含量大值区出现在近地面层且较长时 间维持;云底在 4 km 左右快速塌陷并且不断抬高 标志着降水结束。

(3) 微波辐射计资料显示,第一次降水开始前 相对湿度、水汽含量、液态水含量和温度曲线同时出 现跃增和峰值,各指标在第一次降水结束后出现较 明显下降,之后快速恢复并出现第二三次峰值,并产 生降水;利用微波辐射计资料反演"*e*-*E*<sub>i</sub>"差值场, 当"*e*-*E*<sub>i</sub>"差值场正值区重合时,冷云中贝吉龙过程 较强,对精细化判断强降水出现和人工增雨潜力区 位置有一定作用。

(4) 微雨雷达可观测云的中下层至地面之间的 降雨状况,本次过程地面有降水时微雨雷达反射率 大于 19 dBz,2 km 高度到地面的雨强为 1 mm • h<sup>-1</sup>,雨滴下落速度大于 6 m • s<sup>-1</sup>,结合微波辐射计 和微雨雷达资料,可以识别出云内物理量指标出现 第二次现峰值时产生的地面降水较弱。

(5)综合以上三种遥感探测资料分析结果,可 以认为本次天气过程有利的人工增雨作业时机出现 两次,第一次在13:45降水刚刚开始至云顶下降到 6 km前;第二次时间较长,云层条件更为有利,即 17:40—21:15云顶高度维持在 8~10 km 的时段; 作业适宜高度为 4~8 km(-20~0℃)。

**致谢:**感谢中国气象科学研究院刘黎平研究员对本文 给予的指导!

#### 参考文献

- 李思腾,马舒庆,高玉春,等,2015. 毫米波云雷达与激光云高仪观测 数据对比分析[J]. 气象,41(2):212-218. Li S T, Ma S Q, Gao Y C, et al, 2015. Comparative analysis of cloud base heights observed by cloud radar and ceilometer[J]. Meteor Mon,41(2): 212-218(in Chinese).
- 李万彪,刘盈辉,朱元竞,等,2001. HUBEX 试验期间地基微波辐射 计反演资料的应用研究[J]. 气候与环境研究,6(2):203-208. Li W B,Liu Y H,Zhu Y J,et al,2001. Anapplication of the measurements by the groundbased microwave radiometers in HUBEX [J]. Clima Environ Res,6(2):203-208(in Chinese).
- 孙晶,杨文霞,周毓荃,2015.河北一次降水层状云系结构和增雨条件 的模拟研究[J].高原气象,34(6):1699-1710. Sun J,Yang W X, Zhou Y Q,2015. Numerical simulations of cloud structure and seedability of a precipitating stratiform in Hebei[J]. Plateau Meteor,34(6):1699-1710(in Chinese).
- 魏重,林海,忻妙新,1985. 毫米波气象雷达的测云能力[J]. 气象学 报,43(3):378-383. Wei C, Lin H, Xin M X,1985. A study of the millimeter wavelength meteorological radar and its cloud detection capability[J]. Acta Meteor Sin. 43(3):378-383(in Chinese).

赵静,曹晓钟,代桃高,等,2017.毫米波云雷达与探空测云数据对比

分析[J]. 气象,43(1):101-107. Zhao J,Cao X Z,Dai T G,et al, 2017. Comparative analysis of cloud observed by millimeter wave cloud radar and sounding[J]. Meteor Mon,43(1):101-107 (in Chinese).

- 赵静,马尚昌,代桃高,等,2016. Ka 波段毫米波云雷达探测能力的分 析研究[J]. 成都信息工程大学学报,31(1):29-34. Zhao J, Ma S C, Dai T G, et al, 2016. Analysis and research on the detection capability of Ka-band milliteter wave cloud radar[J]. J Chendu Univ Inform Technol,31(1):29-34(in Chinese).
- 钟剑,黄思训,张亮,2010. 星载微波散射计资料反演海面风场进展研 究[J]. 气象科学,30(1):137-142. Zhong J, Huang S X, Zhang L,2010. Research on the development of surface wind retrieval from microwave scatterometer[J]. Sci Meteor Sin, 30(1):137-142(in Chinese).
- 仲凌志,刘黎平,葛润生,等,2011. 毫米波测云雷达的系统定标和探测能力研究[J]. 气象学报,69(2):352-362. Zhong L Z,Liu L P, Ge R S,et al,2011. A study of the calibration of the new generation of millimeter wavelength cloud radar (HMBQ) and its detection capability[J]. Acta Meteor Sin,69(2):352-362(in Chinese).
- 朱元竞,胡成达,甄进明,等,1994. 微波辐射计在人工影响天气研究 中的应用[J]. 北京大学学报(自然科学版),30(5):597-606. Zhu Y J,Hu C D,Zhen J M,et al,1994. The role of microwave radiometer in weather modification research [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 30(5):597-606(in Chinese).
- 宗蓉,2014. 毫米波雷达对云宏微观特性的探测和研究[D]. 南京;南 京信息工程大学. Zong R,2014. Studies of cloud macro- and microphysical properties using China new generation millimeterwavelength radar[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).

- Fox N I,Illingworth A J,1997a. The retrieval of stratocumulus cloud properties by ground-based cloud radar[J]. J Appl Meteor, 36 (5):485-492.
- Fox N I.Illingworth A J.1997b. The potential of a spaceborne cloud radar for the detection of stratocumulus clouds[J]. J Appl Meteor, 36(6):676-687.
- Frisch A S, Fairall C W, Snider J B, 1995. Measurement of stratus cloud and drizzle parameters in ASTEX with a Kα-band Doppler radar and a microwave radiometer[J]. J Atmos Sci, 52(16): 2788-2799.
- Hobbs P V, Funk N T, 1984. Cloud and precipitation studies with a millimetre-wave radar: a pictorial overview [J]. Weather, 39 (11):334-339.
- Hobbs P V,Funk N T,Weiss Sr R R,et al,1985. Evaluation of a 35 GHz radar for cloud physics research [J]. J Atmos Oceanic Technol,2(1):35-48.
- Kollias P, Clothiaux E E, Miller M A, et al. 2007. Millimeter-wavelength radars: new frontier in atmospheric cloud and precipitation research[J]. Bull Amer Meteor Soc. 88(10):1608-1624.
- Miller M J, Verlinde C G, Tongue J, et al, 1997. Cloud detection using the WSR-88D: an initial evaluation. Preprints [M]. 28th Conf on Radar Meteorology. Austin: Amer Meteor Soc: 442-443.
- Moran K P, Martner B E, Post M J, et al, 1998. An unattended cloudprofiling radar for use in climate research[J]. Bull Amer Meteor Soc, 79(3):443-455.
- Paulsen W H,Petrocchi P J,McLean G,1970. Operational utilization of the AN/TPQ-11 cloud detection radar[R]. Cambridge: Air Force Cambridge Research: 59.
- Uttal T, Intrieri J M, Eberhard W L, et al, 1995. Cloud boundary statistics during FIRE II[J]. J Atmos Sci, 52(23): 4276-4284.