

白婷,黄毅梅,樊奇,2020.河南一次降水天气过程人工增雨作业条件综合分析[J].气象,46(12):1633-1640. Bai T, Huang Y M, Fan Q, 2020. Comprehensive analysis on the conditions of artificial precipitation enhancement during a precipitation weather process in Henan Province[J]. Meteor Mon, 46(12):1633-1640(in Chinese).

河南一次降水天气过程人工增雨作业条件综合分析*

白婷^{1,2} 黄毅梅^{1,2} 樊奇^{1,3}

1 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室,郑州 450003

2 河南省人工影响天气中心,郑州 450003

3 河南省气象探测数据中心,郑州 450003

提 要: 利用 NCEP/NCAR 再分析资料、卫星、雷达及飞机等探测资料,综合分析了河南省 2018 年 11 月 5 日一次降水过程人工增雨作业条件。结果表明:此次降水过程主要受低空切变线和地面冷锋共同影响,飞机作业区具有较好的水汽条件以及较厚的冰面过饱和层,动力条件有利于促进降水发生发展;飞机作业区主要为层积混合云,云系处于发展阶段。重点对比分析了卫星反演的过冷水区与飞机探测粒子数浓度对应关系,发现当 FY-4A 卫星可见光通道、3.7 μm 通道和红外通道资料进行三色合成分析云中存在过冷水时,云气溶胶粒子探头探测的粒子数浓度也高于 20 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$,两者具有较好对应关系,表明三色合成分析云中过冷水方法可应用于人工增雨作业区选择条件之一。

关键词: 冷锋,人工增雨,作业条件,FY-4A,飞机探测,三色合成分析

中图分类号: P481

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.12.010

Comprehensive Analysis on the Conditions of Artificial Precipitation Enhancement During a Precipitation Weather Process in Henan Province

BAI Ting^{1,2} HUANG Yimei^{1,2} FAN Qi^{1,3}

1 Key Laboratory of Agrometeorological Support and Application Technique, CMA, Zhengzhou 450003

2 Weather Modification Center of Henan Province, Zhengzhou 450003

3 Henan Meteorological Observation and Data Center, Zhengzhou 450003

Abstract: Based on the NCEP/NCAR reanalysis data, satellite, radar and aircraft observation data, the artificial precipitation enhancement conditions of the 5 November 2018 precipitation process in Hennan Province were analyzed. The results show that the precipitation process was mainly affected by the low-level shear line and the surface cold front. The operational area of the aircraft had a better water vapor condition and a thick ice surface supersaturated layer, and the dynamic conditions were conducive to promoting the development of precipitation. The aircraft operating area was almost full of stratified hybrid clouds, and the cloud system was in a developing stage. In addition, the relationship between the supercooled water area of satellite inversion and the number concentration of the aircraft detection particles was emphatically analyzed. It was found that when using the FY-4A satellite visible light channel, 3.7 μm channel and infrared channel data to conduct the three-color synthesis analysis on the supercooled water in the cloud, the number concentration of particles detected by the aerosol particle probe is also greater than 20 cm^{-3} . They

* 中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2014M33)、河南省气象局科研项目(KM201720)和中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室应用技术研究基金项目(KQ202022)共同资助

2019年6月28日收稿; 2020年9月10日收修定稿

第一作者:白婷,主要从事人工影响天气研究. E-mail: higateby@163.com

通讯作者:黄毅梅,主要从事云降水物理与人工影响天气研究. E-mail: huangyimei@sina.com

have a good correspondence, indicating that the method analyzing supercooled water in the cloud by the three-color synthesis could be applied to one of the selection conditions of the artificial precipitation enhancement area.

Key words: cold front, artificial precipitation enhancement, operational condition, FY-4A, aircraft observation, three-color synthesis

引 言

人工影响天气是指为避免或者减轻气象灾害,合理利用气候资源,在适当条件下通过科技手段对局部大气的物理过程进行人工影响,实现增雨雪、防雹、消雨、消雾、防霜等目的的活动(郭学良,2010)。人工增雨是目前应用最为广泛的一种人工影响天气方式。

如何快速有效地选择合适的作业时机、作业部位和催化剂进行人工增雨作业,一直是人工影响天气工作的重要课题。国内外已有很多学者对其开展了研究工作。20 世纪 70 年代 Hobbs(1991)对美国温带气旋云系和地形云进行了探测试验,提出利用 FSSP 探头观测到云中大于 $2\ \mu\text{m}$ 的粒子总浓度超过 $10\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时判断为云水区;李铁林等(2010)利用 2007 年 3 月 3 日 PMS 粒子测量系统,分析了河南一次层状云的微物理特征;李宝东等(2014)利用飞机探测资料结合常规天气资料,分析了河北春季层状云增雪作业技术指标;党娟等(2016)利用飞机微物理探测资料,分析了甘肃省东南部地区一次层积云微物理结构特征;李红斌等(2008)利用 2003—2005 年大连降水天气过程的雷达速度场资料,总结了不同雷达回波零速度线的分布特征对人工增雨潜力和作业条件的判别指标;洪延超和李宏宇(2008)利用常规观测资料和模式产品,通过分析云结构和降水机制等研究了人工增雨条件;孙玉稳等(2015)将天气、卫星、雷达、探空等资料与云微物理特征结合,多角度分析了 2013 年 4 月 19 日增雨作业技术与催化的宏微观响应;彭冲等(2016)针对 2012 年 9 月 25 日山西一次低槽冷锋层状云,实现对云微结构的精细观测,同时结合卫星、雷达、探空等资料进行该云系的综合分析;周亦凌和姚展予(2017)利用雷达数据和常规气象资料综合分析了泰安一次积层混合云人工增雨作业的天气条件,并依据雷达回波参量的变化判断此次作业效果。

目前研究大多只是利用一种或多种常规气象资

料结合飞机探测资料,来探讨人工增雨作业条件、判别指标和效果分析,基于卫星的云微物理特征研究较少,将卫星资料与飞机探测数据对比分析的研究更为鲜见。为此,本文利用天气、FY-4A 数据、雷达及飞机探测资料,综合分析河南一次降水过程人工增雨作业条件,重点对比分析了利用 FY-4A 资料与飞机探测资料识别作业条件情况,为更好地开展人工影响天气业务提供参考。

1 天气形势及增雨作业情况

1.1 天气形势分析

图 1 为 2018 年 11 月 5 日天气形势。14 时,500 hPa 高度场上河南省受槽前西南气流影响,700 hPa 陕西中部有一低涡,切变线位于山西中部、陕西中南部至四川中部一线,850 hPa 切变线位于贵州东部、湖南北部至河南南部一线;20 时,700 hPa 低涡南压,切变线位于四川东部至河南西南部一线,850 hPa 切变线由东北—西南向顺时针转为近似东西向,位置变化不大。地面图上,5 日 14 时,地面冷锋位于江苏北部、河南南部、湖北中部至四川东部一带,20 时地面冷锋移至安徽中部、湖北中部到重庆中部一带。因此,河南省此次降水过程主要受低空切变线和地面冷锋共同影响。

1.2 飞机增雨作业情况

11 月 5 日下午河南省进行了飞机人工增雨作业,增雨作业使用的飞机为 Y-12,该飞机装备了增雨作业装置和机载云物理探测系统(Droplet Measurement Technologies,DMT),作业飞行速度为 $250\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右,携带碘化银烟条 16 根,每根烟条 AgI 含量约为 125 g。作业飞机航线为新郑—陕县—方城县—叶县—嵩县—伊川县—郑县—新郑(图 2)。14:22 飞机起飞,900 m 高度入云,爬升至 4250 m 保持平飞,作业时间为 14:55—17:25,作业层温度为 $-6.3\sim-5.32^{\circ}\text{C}$,作业区观测到中度积冰,飞机于 18:05 降落。

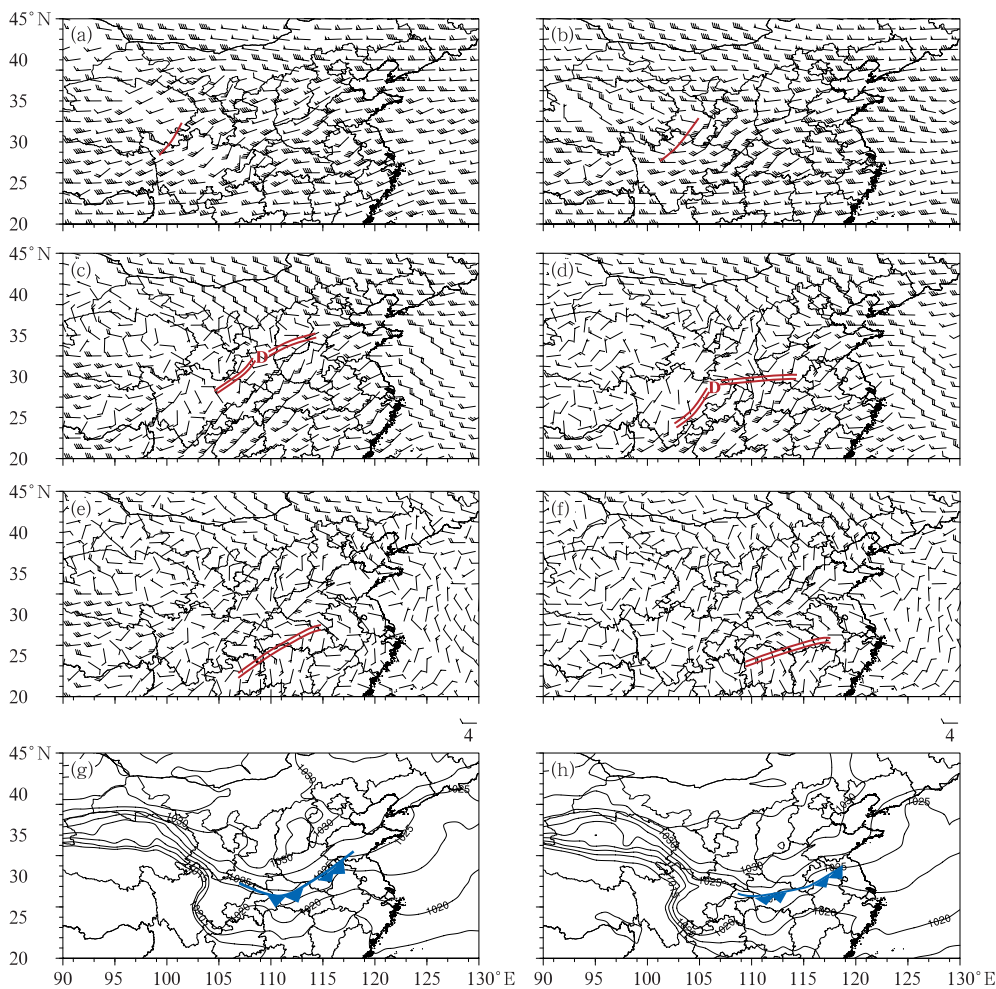


图 1 2018 年 11 月 5 日 14 时(a,c,e,g)和 20 时(b,d,f,h)500 hPa(a,b),700 hPa(c,d),
850 hPa(e,f)风场及海平面气压场(g,h;黑线,单位:hPa)
(红线代表槽线,D 代表低涡中心,双红线代表切变线,蓝色带三角曲线代表冷锋)

Fig.1 The 500 hPa (a, b),700 hPa (c, d), 850 hPa (e, f) wind field and sea level pressure field
(g, h; black lines, unit: hPa) at 14:00 BT (a, c, e, g) and 20:00 BT (b, d, f, h) 5 November 2018
(red lines: trough lines, letter D: the center of low vortex,
double red lines: shear lines, blue triangular curves: cold fronts)

2 作业条件分析

2.1 水汽及动力条件分析

11 月 5 日 14 时,河南淮河以北大部分地区处于冰面过饱和区,并且该区域为垂直上升气流区(图 3)。沿 34°N 做垂直剖面,可以看出:作业区(111°~113.3°E)600 hPa 以上为冰面过饱和层(图 4a);925~550 hPa 水汽通量散度为负,550 hPa 以上为正,800 hPa 高度上水汽输送最强(图 4b),这种低层辐合高空辐散的形势,有利于整层大气的抽吸

作用,促进低层大气向高层输送水汽;垂直运动剖面(图 4c)显示,925~550 hPa 为弱的上升运动。综上所述,11 月 5 日作业区有较厚的冰面过饱和层,具有较好的水汽条件和促进降水发生发展的动力条件,具有一定人工增雨作业潜力。

2.2 雷达回波特征

图 5 给出了作业期间洛阳雷达回波演变。洛阳雷达站距离飞机作业区中心约为 46 km 左右,雷达型号为 CINRAD/SA。由图可以看出,14:30—17:00 雷达回波自西向东移动,表现为层积混合云回波特征,强度在 20~40 dBz,最大值达到 45 dBz,

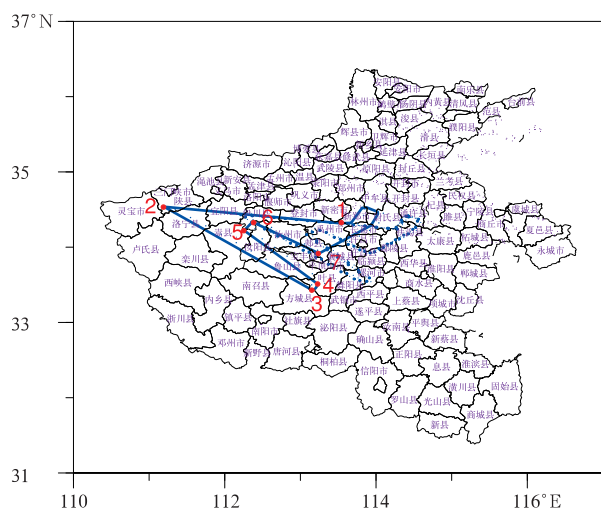
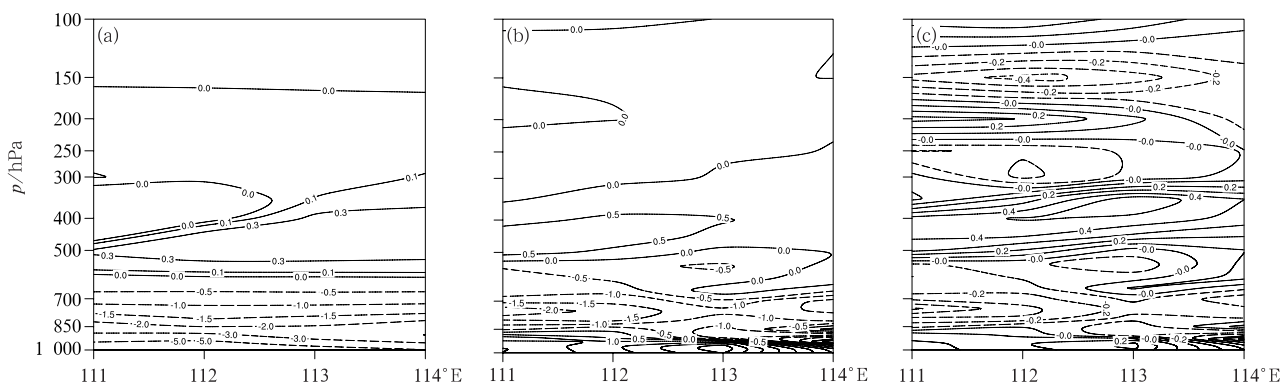


图 2 2018 年 11 月 5 日作业航线

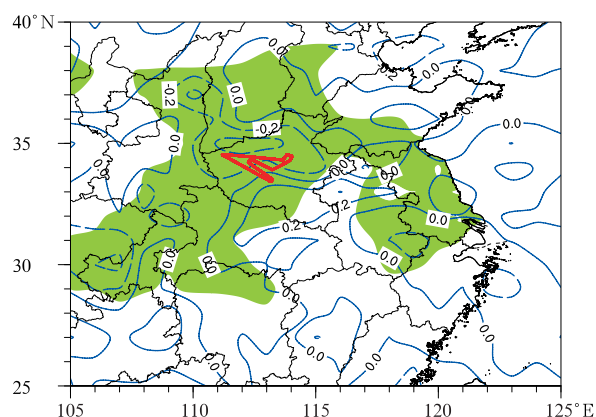
(蓝线代表作业航线, 数字代表飞行轨迹拐点)

Fig. 2 Operation route on 5 November 2018

(blue line: the operation path,
numbers: the inflection points of flight path)图 4 2018 年 11 月 5 日 14 时冰面过饱和水汽压(a, 单位: hPa)、水汽通量散度(b, 单位: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
和垂直速度(c, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)沿 34°N 垂直剖面Fig. 4 Vertical profiles along 34°N of supersaturated vapor pressure of ice surface (a, unit: hPa),
water vapor flux divergence (b, unit: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and
vertical velocity (c, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) at 14:00 BT 5 November 2018

作业期间飞机基本处于回波区。对回波强度大于 15 dBz 的区域进行统计, 发现 14:36—17:00 回波平均值在 20~23 dBz, 变化率为 $1.2 \text{ dBz} \cdot \text{h}^{-1}$, 表明雷达回波随时间呈增强趋势, 降水云系处于发展阶段。图 6 给出了沿飞行轨迹的雷达回波垂直剖面, 从图中可看出, 回波顶高 6~8 km, 云中有对流泡, 云体发展旺盛, 回波顶高甚至超过 8 km。飞机作业高度位于云体中上部。

综合以上分析, 飞机作业区雷达回波逐步增强, 云系处于发展阶段, 具有较好的增雨作业条件。

图 3 2018 年 11 月 5 日 14 时 550 hPa 冰面过饱和水汽压
(绿色阴影, 单位: hPa) 和 700 hPa 垂直速度
(蓝色等值线, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) (红线为作业航线)Fig. 3 The 550 hPa supersaturated vapor pressure of
ice surface (green shaded) and 700 hPa
vertical velocity (blue contour, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)
at 14:00 BT 5 November 2018
(red line: operation route)

3 卫星反演与飞机探测对比

3.1 飞机作业探测情况

作业飞机装载了 DMT 系统, 采样探头为云气溶胶粒子探头 (cloud aerosol spectrometer, CAS), 该探头分为前向散射和后向散射两档, 本文主要选取 CAS 前向散射档测得的云粒子数浓度。陶树旺等(2001)提出, FSSP-100 探头观测到的冷云区粒子

浓度 ≥ 20 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 才具有可播性,CAS 探测范围与 FSSP-100 探头探测范围相近,具有可比性,因此,参考上述指标,探究作业区增雨条件。飞机探头的采样频率为 1 s,由于探测的云中物理量起伏剧烈,因此探测资料分析时采用 10 s 平滑处理。

图 7 给出了 11 月 5 日飞行探测云粒子的数浓度、飞行高度及其所在高度的温度、湿度随时间分布,图中黄色虚线标记的数字对应图 2 中飞行轨迹

拐点。从图 7 可以看出,11 月 5 日飞行作业层高度为 4200 m,温度为 -6°C ,相对湿度在 90% 以上。作业时段(14:48—17:19)粒子浓度分布不均,数浓度最大为 330.72 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$,平均值为 15.90 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$,其中 15:28—16:27 时段大部分时间探测的粒子数浓度在 20 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 以上,表明该时段适宜实施人工增雨作业。

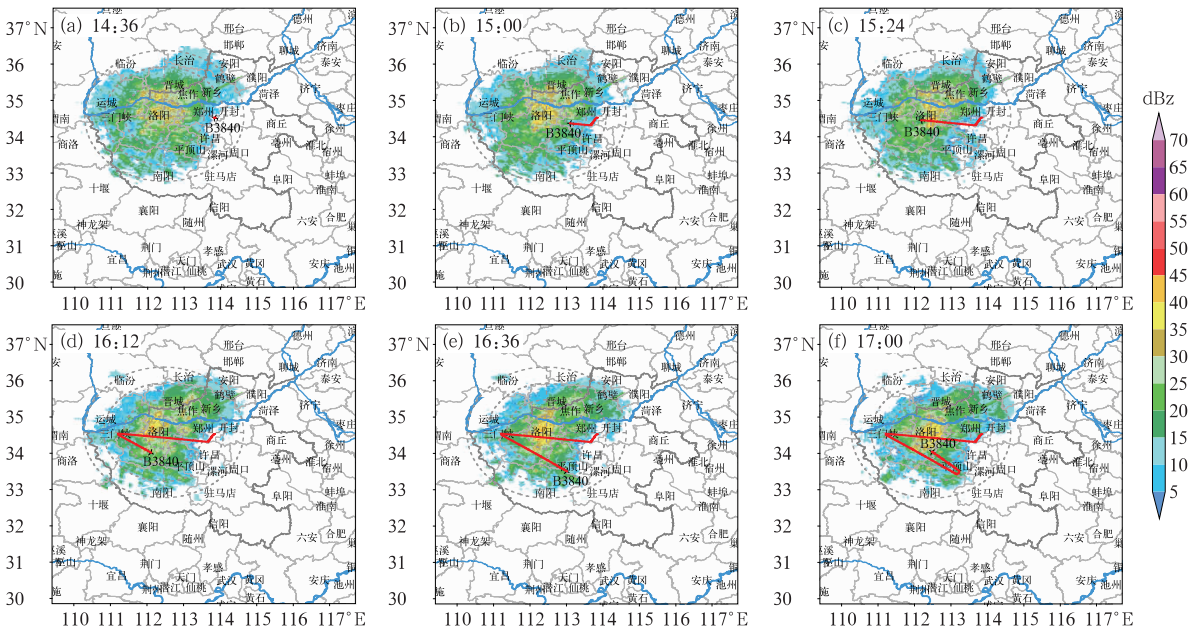


图 5 2018 年 11 月 5 日不同时刻(a~f)洛阳雷达回波组合反射率(填色)

(红线代表飞行轨迹)

Fig. 5 Composite reflectivity (colored) of the Luoyang Radar at different times (a—f) on 5 November 2018

(red line: flight path)

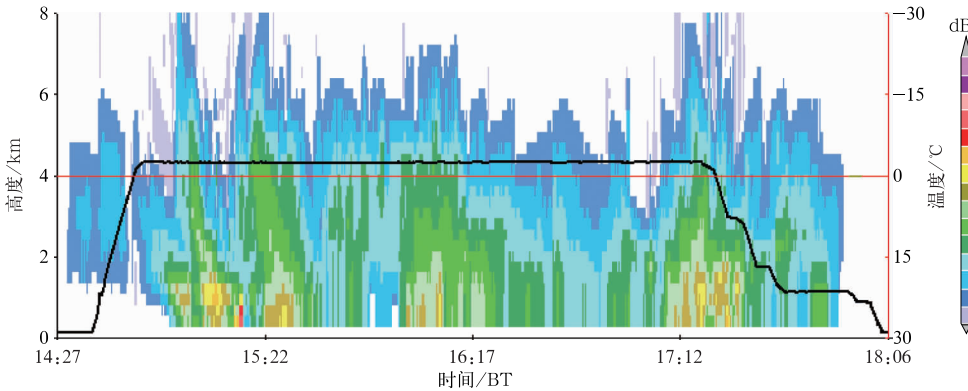


图 6 2018 年 11 月 5 日沿飞行轨迹的雷达剖面(填色)

(黑线代表飞行高度,红线代表零度层高度)

Fig. 6 Radar profile (colored) along the flight path on 5 November 2018

(black line: flight altitude, red line: the zero-degree layer altitude)

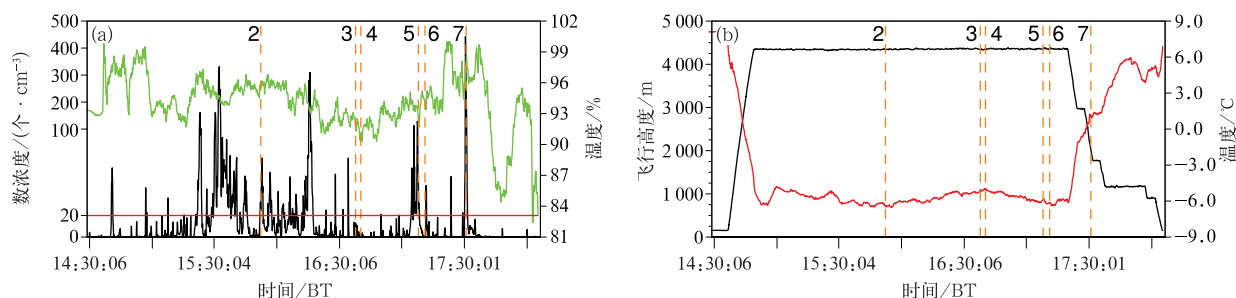


图 7 2018 年 11 月 5 日 (a) 云粒子的数浓度 (黑线; 红线代表数浓度等于 $20 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$) 及其所在高度的湿度 (绿线), (b) 飞行高度 (黑线) 及所在高度温度 (红线) 随时间分布
(数字 2~7 对应图 2 飞行轨迹拐点)

Fig. 7 (a) The number concentration of cloud particles (black line) and the humidity at the same height (green line), (b) the flying height of aircraft (black line) and the temperature at the same height (red line) on 5 November 2018
(The numbers 2—7 correspond to the inflection point of the flight path in Fig. 2 respectively; the red line in Fig. 7a represents the number of concentrations equal to 20 cm^{-3})

3.2 卫星反演识别作业区与飞机探测情况对比

FY-4A 作为新一代静止轨道定量遥感气象卫星, 覆盖了可见光、短波红外、中波红外和长波红外等波段, 可见光空间分辨率为 0.5 km 。分别赋予可见光反射率为红色(R)、中红外 ($3.7 \mu\text{m}$) 反射率为绿色(G)、红外反射率 ($10.8 \mu\text{m}$) 为蓝色(B), 对其进行组合编码, 形成 RGB 图像, 可以显示云的物理特

征(刘贵华等, 2011)。红色表示云层由大粒子组成, 厚而明亮, 且云顶温度低; 黄色表示由有效半径小的云滴组成, 厚的过冷水云在 RGB 合成图上显示为亮黄色; 绿色表示含过冷水或小冰粒子的薄云; 蓝色表示地表(刘贵华等, 2009)。

利用上述方法的 RGB 三色合成, 得到 FY-4A 卫星 RGB 合成图(图 8)。可以看出, 11 月 5 日 14:30 豫西、豫东南及豫中部分地区为黄色云区, 其他地

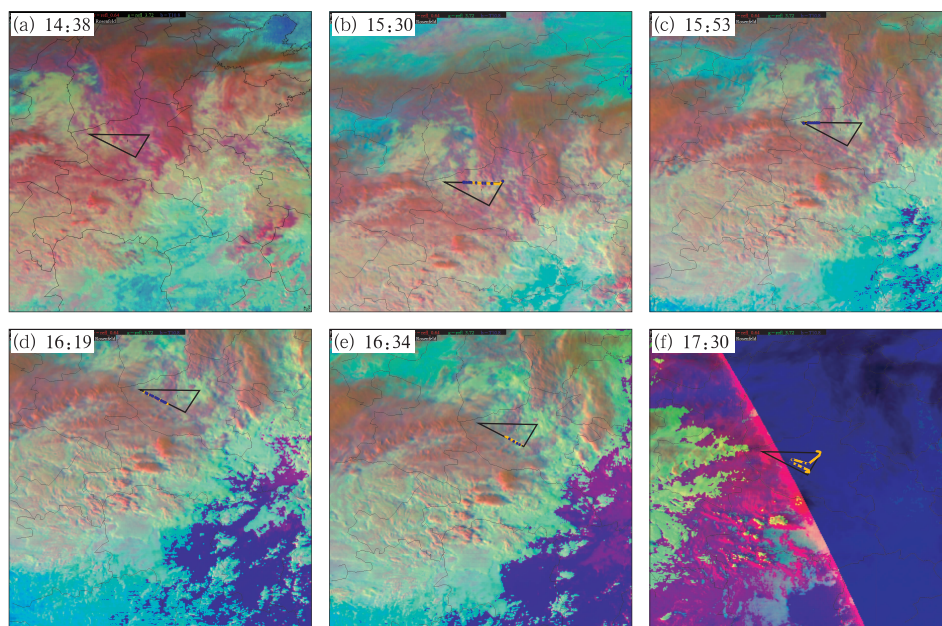


图 8 2018 年 11 月 5 日不同时刻(a~f)FY-4A 卫星 RGB 合成图及飞行航线分布
(蓝线表示数浓度 $\geq 20 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 黄线表示数浓度 $< 20 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$)

Fig. 8 FY-4A satellite RGB composite images and flight route distribution at different times (a—f) on 5 November 2018
(Blue line represents number concentration greater than or equal to 20 cm^{-3} , and yellow line represents number concentration less than 20 cm^{-3})

区为红色云区,随时间推移,云区东移,东南部被红色或浅红色云区覆盖,西部和中部部分地区一直有黄色或黄绿色云区覆盖,说明此次过程豫西和豫中部分地区一直存在过冷水,增雨潜力较好。

图 8 对比了 FY-4A 卫星 RGB 合成图与飞机探测的云粒子数浓度对应关系,图中蓝线表示飞机探测的小粒子数浓度 ≥ 20 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 的航线,黄线表示数浓度 < 20 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 。可以看出,卫星反演识别存在过冷水的区域与飞机探测小粒子数浓度 ≥ 20 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 的航线有对应关系,16:19 之前作业区(图中三角框)以红色、黄色或黄绿色云区为主,说明该区域具有一定过冷水,飞机航线上蓝色部分也较多;16:19 之后作业区开始以绿色或蓝色为主,说明云层变薄或消散,对应飞机航线上黄色部分增多。

进一步详细对比分析 RGB 合成图与飞机探测的云粒子数浓度对应关系。14:38 飞行区域充满了红色和黄色的云区,红色云区表明云中的粒子较大,云顶温度较低,黄色云区表明为较厚的过冷水云,此时飞机起飞不久,未入云,测得的粒子数浓度以 $0\sim 0.5$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 为主(图 8a);15:30 红色云区减少,黄色的过冷水云增多(图 8b),飞机探测的 14:48—15:30 粒子数浓度平均值为 10.76 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$;15:53 黄色部分逐渐变成黄绿色(图 8c),说明云层变薄但有过冷云滴存在,15:31—15:53 粒子数浓度平均值为 40.85 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$;16:19 之后飞行区域内绿色越来越明显,部分地区甚至开始出现蓝色(图 8d,8e),15:54—16:19 粒子数浓度平均值为 25.76 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$;16:20—16:34 为 3.6 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$;17:30 飞行区域基本完全是蓝色的地表(图 8f)。作业时段(14:48—17:19)内,14:48—16:19 粒子数浓度最大为 330.72 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$,平均值为 23.20 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$;16:20—17:19 粒子数浓度最大为 122.99 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$,平均值为 5.65 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 。对比发现,16:19 之前探测到的云粒子数浓度超过 20 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 占比例更大,数浓度值更高,说明 16:19 之前较 16:19 之后作业条件更好,这与前面分析 RGB 合成图发现 16:19 之前存在过冷水相对应。

综合以上分析,卫星反演和飞机探测结果有较好的对应关系,卫星反演显示 5 日下午豫西和豫中部分地区增雨潜力较好,16:19 之后作业区条件逐渐转差;飞机探测结果显示 16:19 之前较 16:19 之后作业条件更好。这表明卫星反演识别人工增雨作业条件与 DMT 探测识别结果比较一致,说明三色

合成方法可应用于人工增雨作业区选择。

4 结 论

通过对 2018 年 11 月 5 日降水过程的人工增雨作业条件分析,得出如下结论:

(1)此次降水过程主要受低空切变线和地面冷锋共同影响形成,飞机作业区具有较好的水汽条件以及较厚的冰面过饱和层,动力条件有利于促进降水发生发展;作业期间作业区主要为层积混合云,雷达回波逐步增强,回波强度在 $20\sim 40$ dBz,云系处于发展阶段,具有增雨作业条件。

(2)飞机探测结果显示整个作业过程粒子分布不均匀,15:28—16:27 适宜人工增雨作业;利用 FY-4A 可见光通道、 $3.7\mu\text{m}$ 通道和红外通道资料进行 RGB 三色合成分析显示,西部和中部部分地区一直有黄色或黄绿色云区覆盖,说明此次过程豫西和豫中部分地区一直存在过冷水,增雨潜力较好。

(3)将 RGB 三色合成分析显示云中存在过冷水的区域与探测的云中粒子数浓度大于 20 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 区域进行对比,表明卫星反演与飞机探测结果有较好的一致性,说明三色合成方法可应用于人工增雨作业区选择。

(4)此次人工增雨过程,作业区域条件适宜,作业科学性较好。

参考文献

- 党娟,刘卫国,陶玥,2016. 一次降水性层积云系的微物理特征分析[J]. 高原气象,35(6):1639-1649. Dang J, Liu W G, Tao Y, 2016. Analysis of cloud microphysical characteristics on a precipitation stratocumulus[J]. Plateau Meteor, 35(6):1639-1649 (in Chinese).
- 郭学良,2010. 大气物理与人工影响天气(上)[M]. 北京:气象出版社. Guo X L, 2010. Atmospheric Physics and Artificially Affected Weather[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 洪延超,李宏宇,2011. 一次锋面层状云云系结构、降水机制及人工增雨条件研究[J]. 高原气象,30(5):1308-1323. Hong Y C, Li H Y, 2011. Cloud structure, precipitation mechanism and artificial enhancement precipitation condition for a frontal stratiform cloud system[J]. Plateau Meteor, 30(5):1308-1323 (in Chinese).
- 李宝东,孙玉稳,孙霞,等,2014. 河北春季一次飞机人工增雪的综合分析[J]. 干旱气象,32(5):819-829. Li B D, Sun Y W, Sun X, et al, 2014. Comprehensive analysis of aircraft artificial precipitation on stratiform clouds in spring over Hebei province[J].

- J Arid Meteor, 32(5):819-829(in Chinese).
- 李红斌,何玉科,姚展予,等,2008.多普勒雷达速度场特征在人工增雨作业中的判据指标应用[J].气象,34(6):102-106. Li H B, He Y K, Yao Z Y, et al, 2008. Application of Doppler radar velocity field characters to precipitation enhancement operation[J]. Meteor Mon, 34(6):102-106(in Chinese).
- 李铁林,雷恒池,刘艳华,等,2010.河南春季一次层状冷云的微物理结构特征分析[J].气象,36(9):74-80. Li T L, Lei H C, Liu Y H, et al, 2010. Microphysical characteristics of a precipitation process in Henan Province[J]. Meteor Mon, 36(9):74-80(in Chinese).
- 刘贵华,余兴,戴进,2009.不同积云微物理特征的卫星反演分析[J].南京气象学院学报,32(1):17-23. Liu G H, Yu X, Dai J, 2009. Satellite retrieval of microphysical properties for different cumuli[J]. J Nanjing Inst Meteor, 32(1):17-23(in Chinese).
- 刘贵华,余兴,戴进,等,2011.地形云人工增雨条件卫星探测反演个例分析[J].气象学报,69(2):363-369. Liu G H, Yu X, Dai J, et al, 2011. A case study of the conditions for topographic cloud seeding based on the retrieval of satellite measurements[J]. Acta Meteor Sin, 69(2):363-369(in Chinese).
- 彭冲,周毓荃,蔡兆鑫,等,2016.一次基于飞机观测的低槽冷锋云系微物理结构的综合分析[J].大气科学学报,39(5):620-632. Peng C, Zhou Y Q, Cai Z X, et al, 2016. A comprehensive analysis of the physical structure of a low trough cold front cloud system based on aerial observation[J]. Trans Atmos Sci, 39(5):620-632(in Chinese).
- 孙玉稳,孙霞,刘伟,等,2015.一次雨夹雪降水过程人工增水作业的综合观测研究[J].气象,41(11):1341-1355. Sun Y W, Sun X, Liu W, et al, 2015. Study of integrated observation on aircraft artificial operation during a sleet event[J]. Meteor Mon, 41(11):1341-1355(in Chinese).
- 陶树旺,刘卫国,李念童,等,2001.层状冷云人工增雨可播性实时识别技术研究[J].应用气象学报,12(S1):14-22. Tao S W, Liu W G, Li N T, et al, 2001. A study of real-time identification of seedability of cold stratiform clouds[J]. Quart J Appl Meteor, 12(S1):14-22(in Chinese).
- 周亦凌,姚展予,2017.一次积层混合云增雨作业天气条件分析和雷达回波效果检验[J].气象与环境科学,40(1):11-20. Zhou Y L, Yao Z Y, 2017. Weather condition analysis and radar echo evaluation of precipitation enhancement operation for a stratiform mixed clouds[J]. Meteor Environ Sci, 40(1):11-20(in Chinese).
- Hobbs P V, 1991. Twenty years of airborne research at the University of Washington[J]. Bull Amer Meteor Soc, 72(11):1707-1717.