

史月琴,刘卫国,王飞,等,2021.一次对流云人工消减雨作业云条件预报和作业预案合理性分析[J].气象,47(2):192-204. Shi Y Q, Liu W G, Wang F, et al, 2021. Forecast on convective cloud condition and analysis on seeding plan of an artificial rainfall mitigation case [J]. Meteor Mon, 47(2):192-204(in Chinese).

一次对流云人工消减雨作业云条件预报和 作业预案合理性分析*

史月琴 刘卫国 王 飞 高 扬

中国气象局云雾物理环境重点实验室,北京 100081

提 要: 为做好固定目标时段和区域的人工消减雨作业,利用云降水显式预报系统(CPEFS_v1.0)对云系性质和结构、移速移向及演变、降水机制等云条件进行预报。预报结果显示,2017年8月8日影响呼和浩特的云系性质为分散性对流云,具有冷暖混合云结构,云中上升气流强,对流单体水平尺度约为几十千米,生命史约为1.5~3 h,云顶高度约为10 km、云底高度约为3 km,0℃高度约为4.3 km;微观方面,冰相水凝物雪、霰含量高,暖区云水含量少,云中过冷水含量最大达 $0.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,过冷水丰沛区域冰晶数浓度低,以冷云降水为主。初生在呼和浩特特定防护区西北方向的对流云团快速发展东移南压影响核心保障区,移速约为 $30\sim 40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。卫星、雷达等实况监测显示,8日的云系为分散性对流云,预报对流云的生成时间比实况偏晚1~2 h,移向与实况一致,移速偏慢 $10\sim 20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。在5400 m高度处(-8°C),机载云物理探测的液水含量最大为 $0.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,预报与实况接近。根据预报的云系条件制定作业预案指出,在核心保障区的偏西北方向30~50 km处进行重点布防,适宜在5.1~7.0 km高度处实施AgI过量催化,8日上午飞机在第一道防线的弱回波区开展探测作业,地面作业集中在第三道防线对流云初生阶段实施过量播撒,以达到消减雨作业的目标。根据预案,提前24 h在核心保障区偏西北方向的第三道防线增设了5个地面移动作业点,这些作业点8日及时实施了消减雨作业。总体看来,此次云条件预报正确、预案制定合理,及时为外场实施消减雨作业提供了支撑。

关键词: 云条件预报;作业预案;对流云降水;人工消减雨

中图分类号: P481

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.02.006

Forecast on Convective Cloud Condition and Analysis on Seeding Plan of an Artificial Rainfall Mitigation Case

SHI Yueqin LIU Weiguo WANG Fei GAO Yang

Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract: In order to do well artificial rainfall mitigation on specific target period and area, cloud seeding condition such as cloud properties and structure, moving speed and direction, cloud evolution, precipitation mechanism and so on was forecast by using Cloud Precipitation Explicit Forecast System (CPEFS). The results showed that on 8 August 2017 in Hohhot there were scattering convective clouds, with cold-warm mixed vertical structure and strong updrafts. Horizontal scale of single convective cloud was about tens of kilometers, and lifetime was about 1.5—3.0 hours. Cloud top (bottom) height of 10 (3) km, and 0°C layer height of 4.3 km. Cloud microphysics aspects were with high content of snow and graupel, low cloud water content in warm regions, maximum content of supercooled water of $0.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, less ice crystals in

* 国家重点研发计划(2018YFC1507900)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY20120625)共同资助

2019年5月15日收稿; 2020年11月24日收修定稿

第一作者:史月琴,主要从事云降水物理与人工影响天气研究. E-mail: shiyq@cma.gov.cn

areas with rich supercooled water, mainly with cold precipitation mechanism. Convective clouds first appeared in the northwest direction of the core zone in Hohhot, rapidly developing and moving eastward and southward gradually to the core zone at the speed about $30\text{--}40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Satellite and radar observations also showed there were convective clouds. The forecasted generation time of convective clouds was 1–2 hours later than observation, but moving direction was consistent with observation. Moving speed was $10\text{--}20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ slower. The maximum liquid water content was $0.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ at the 5400 m height (-8°C) by airborne cloud physical detection. The forecasted cloud water content was consistent with detection. The seeding plan was made based on cloud condition forecast. The area 30–50 km northwest of the core zone was chosen as key defense zone. AgI over-seeding would be suitable to be implemented in the 5.1–7.0 km height. In the morning of 8 August the aircraft would carry out detection in weak echo areas of the first defense line. Ground operations would focus on the implementation of over-seeding in the initial stage of convective clouds in the third defense line to achieve the goal of rainfall mitigation. Based on the plan, additional five sets of ground mobile seeding equipment were added to reinforce the capability of rainfall mitigation ahead of 24 hours of target time. Rainfall mitigation was carried out with the 5 sets equipment. In summary, the cloud seeding condition forecast was proper, and the seeding plan was reasonable, which provided strong support for field rainfall mitigation action.

Key words: cloud seeding condition forecast, seeding operation plan, convective cloud precipitation, artificial rainfall mitigation

引言

人工消减雨是通过在云中适当时间、适当部位过量播撒催化剂,抑制特定目标区云和降水的发展,从而使目标区降水减少,降低降水对重大社会活动或体育赛事等的影响。1960—1964年美国开展的白顶催化试验(Lovasich et al, 1971)表明人工过量播撒 AgI 可导致目标区降水减少。张纪淮等(2005)认为在影响保护区的降水云系上风方,对云系进行大规模、连续催化作业可以设法改变降水分布、使保护区内无雨或出现小雨空隙。叶家东(1993)指出人工抑制暴雨主要有截流效应、竞争场效应和降水空间再分布3种假设。2008年8月8日,北京西南部的房山和东北部的密云出现了小雨到暴雨不同量级的局地降水,气象部门在北京西南部针对可能影响奥运场馆的云系实施了过量火箭催化作业,作业云的雷达回波强度减弱,高度降低,奥运会开幕式活动成功举办(何晖和马建立, 2008; 张蕾等, 2009)。2014年8月16日南京青奥会开幕式期间,气象部门采用过量播撒 AgI 的方式实施了人工消减雨作业,作业后奥体场馆附近的降水出现一定程度的减弱现象(张慧娇, 2018),在减雨目标区的目标时段,回波强度和回波顶高均呈减弱趋势(倪思聪和魏鸣, 2018),明显改变了雨滴谱分布,有效减小

了雨滴群中的大粒子,从而抑制了降雨的发展,起到减雨效果(潘雯菁等, 2019)。近年来人工消减雨的需求日益增多,目前虽积累了一定的经验和技術,但从科学技术角度看人工消减雨比人工增雨要难很多,仍属于科学试验的范畴,远没有形成成套技术。

国内外学者通过开展的人工消减雨外场试验和数值模拟研究提出了催化作业条件指标判据,如孙晶等(2010)利用数值模式研究了人工减缓梅雨锋暴雨的数值试验,结果表明在 $-11\sim-8^{\circ}\text{C}$ 的高度上过冷水丰富区域进行冰晶的过量播撒能够使区域降水减少,播撒剂量加大时减雨效果越明显。楼小凤等(2014)利用耦合了 AgI 类催化剂核化过程的三维对流云模式,研究了人工减缓对流云降水的可能性及原理,指出在云中上升气流区大剂量播撒可以减少总降水量及降水中心的雨强,并且催化剂量越大减雨效果越显著。何晖等(2012)利用改进的具有 AgI 类催化功能的 MM5 模式,对 2008 年奥运会开幕式消减雨试验进行了催化数值研究,选择云体接近成熟时 6000~6500 m 的过冷区,有大量过冷云水而冰晶浓度低的区域以 $5\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速率持续播撒 AgI 7 min,显示播撒作业后 2 h,催化区域内均表现为减雨。选择消减雨作业时机和部位时,主要关注云和降水的宏微观特征,如云团性质、移向移速,将温度、上升气流、过冷水含量和冰晶数浓度等作为催化播云的指标判据。因此当开展消减雨作业云条件

预报时,也将重点关注这些云宏微观特征,依据预报的云系条件制定消减雨作业预案,为提前部署作业力量、申请空域提供科学依据,有利于消减雨催化作业的高效实施。

在开展人工增雨抗旱作业时,通过分析云系宏微观特征,选择适宜开展增雨作业的区域实施催化作业,但对于有明确保障任务的消减雨作业,一般都有明确固定的保障时段和保障地点。那么在开展消减雨作业条件预报时,就应该重点关注可能影响场馆的云系,移动方向影响装备部署位置,移动速度影响拟开展作业的时间,云系性质影响催化方式的选择,这对云条件预报和作业预案制定提出了更高的要求和挑战,尤其是对华北区域 8 月的云系进行定时、定点、定量的精细预报,由于发生对流性天气的概率很大,因而具有更大的困难。

本文利用云降水显式预报系统(CPEFS_v1.0)产品,对 2017 年 8 月 8 日可能影响呼和浩特特定场馆的云条件进行预报,制定消减雨作业预案,结合卫星、雷达、机载探测等实况资料以及地面作业情况,对云条件预报进行检验,分析作业预案的合理性,可为今后开展相关工作提供技术思路及经验借鉴。

1 云降水显式预报系统及产品

1.1 CPEFS_v1.0 模式系统和产品

云微物理过程的正确表述对于数值预报至关重要。根据不同降水云系的特征及增雨、防雹需求,中国气象科学研究院(CAMS)胡志晋和严采繁(1986)和 Hu and He(1988)研发了层状云、积状云微物理数值模式,研制了双参数详细微物理过程的中尺度云分辨模式,该方案将水凝物分为云水、雨水、冰晶、雪和霰,同时预报其比质量及数浓度,同 MM5、GRAPES、WRF 等天气动力模式耦合,成功模拟了不同降水过程(楼小凤,2002;史月琴等,2008;高文华等,2012;Lou et al,2012)。经过改进冰晶异质核化和同质冻结核化过程,将改进后的 CAMS 方案耦合到 WRF v3.5,通过改进前处理系统和后处理系统,开发形成云降水显式预报系统(CPEFS_v1.0),该系统于 2017 年 7 月 28 日正式业务运行,每日 08 时和 20 时采用 T639 全球模式的预报场作为初始场和侧边界条件启动模式,预报时效为 48 h。

根据全国人工影响天气发展规划的 6 大分区,结合计算资源和云系特征,该模式系统将全国大陆

范围分为 8 大区域(图 1a),提供水平分辨率为 3 km 的云宏观场、云微观场、云系垂直结构和降水场等 4 大类预报产品,主要包括云带、垂直累积过冷水、云顶(底)高度/温度、雷达反射率、最大雷达反射率、各种粒子的比质量、数浓度等物理参量。预报数据产品和图形产品通过气象业务网发布,支撑各级人工影响天气业务单位开展作业条件潜力预报业务。

本次作业条件潜力预报采用 CPEFS_v1.0 华北区域的预报资料,模式水平方向采用二重双向嵌套,格距为 9 km 和 3 km(图 1b),分别采用 5 min 和 30 s 的地形数据,垂直方向为 35 层,模式顶气压为 50 hPa。对于 9 km 大网格,选用 KF-eta 对流参数化方案、CAMS 云物理方案、YSU 边界层方案、RRTM 长波辐射方案、GSFC 短波辐射方案。3 km 细网格关闭对流参数化方案,其余物理过程选项一致。可以采用大网格的预报资料分析天气形势演变,而对于云场的分析,则采用细网格的预报资料,尽可能详细地分析云系的宏微观结构特征。

1.2 云带及垂直累积过冷水产品

云带的发展演变、移动、强度直接影响到人工增雨/消减雨试验作业区域的选择,通过云带产品,可以测算云系的落区分布、移动方向和移动速度等(孙晶等,2015)。将模式预报的每一层的云水(qc)、雨水(qr)、冰晶(qi)、雪(qs)和霰(qg)的比质量求和后垂直积分,形成云带产品(单位:mm)。

$$cband = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_{top}} [qc(p) + qr(p) + qi(p) + qs(p) + qg(p)] dp$$

过冷水是指在低于 0℃ 的区域存在的液态水,过冷水含量的多少决定催化增雨潜力的大小(刘涛等,2015)。将预报的温度低于 0℃ 区域的每一层的云水和雨水比质量相加并垂直积分,得到垂直累积过冷水(VISL,单位:mm)产品,垂直累积过冷水是人影作业中的关键技术指标。

$$VISL = \frac{1}{g} \int_{p_{(t=0)}}^{p_{top}} [qc(p) + qr(p)] dp$$

对于数值预报产品的检验,主要集中在两方面,一是针对模式产品如温度、降水量等的定量化统计检验,另一个是以预报员思路为基础的主观天气学检验(毛冬艳等,2014)。但对于水平分辨率小于 4 km 的高时空分辨率数值模式预报产品,其检验仍一直在研究和探讨之中,尤其是对于模式预报的云系产品,尚缺乏较为成熟的检验技术。卫星反演的

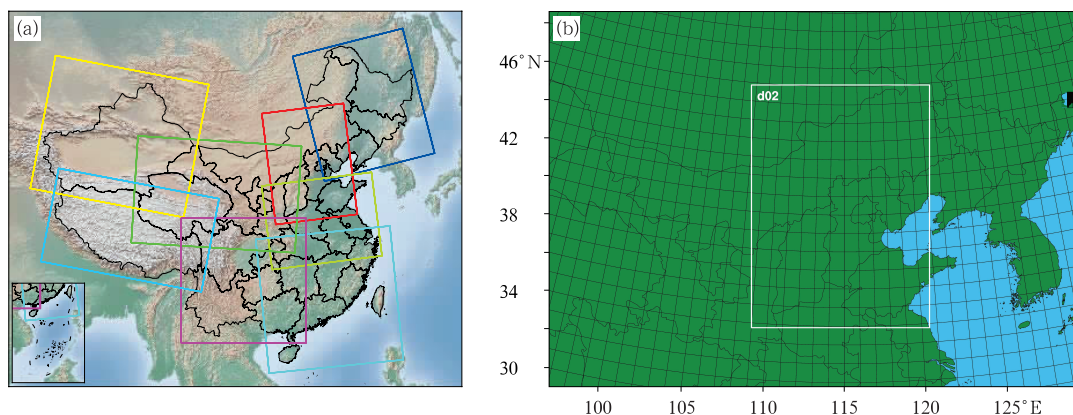


图1 (a)CPEFS_v1.0 模式预报区域和(b)华北区域预报范围示意图

Fig. 1 Sketch maps of (a) CPEFS_v1.0 prediction area and (b) prediction region of North China

云顶高度,是指云顶相对地面的距离,云光学厚度是云系在整个路径上云消光的总和。对于对流云降水,云顶高度与光学厚度相关性较好,通常云顶越高,光学厚度越大,并且产生降水时,云光学厚度大多数大于17,云顶高度普遍大于7 km,当光学厚度大于20时地面雨强明显增大(周毓荃等,2011)。将模式预报的云带产品与卫星反演云特征参量进行对比,可以定性检验模式预报能力。

2 云条件预报

在开展消减雨作业云条件预报时,通常是先分析预报的云场、降水场、动力热力场等产品,结合已有高空、地面、卫星、雷达等观测资料,确定影响天气过程类型,分析云系性质、移向移速、演变趋势,云顶(底)温度/高度、云体厚度、 0°C 、 -5°C 、 -10°C 特征温度层的高度等宏观结构,云系垂直结构,过冷云水含量、冰粒子含量等微观结构,明确冷暖云垂直结构配置,判断降水机制,综合给出预报结论。

2.1 云系性质及移向移速发展演变预报

预报显示,随着高空槽东移南压,8日08时之后呼和浩特特定保障区西部中低层辐合加强,不稳定条件增加,内蒙古中部K指数大于 30°C ,700 hPa水汽通量较大,将有一次对流天气过程。

利用8月7日08时预报结果分析云系性质及其发展演变,重点保障时段为8日15—19时。结果显示,8日12时在防护区的西北和东北方向分别生成分散性的小块云团,之后云团水平面积扩大,强度增强。13时防护区西北方向的云团向东、向南扩

展,移动加强,距离核心保障区约100 km;防护区东北方向的云团发展加强并向东扩展移动,不会影响核心保障区;距离核心保障区100 km正南方向生成一块孤立的云团,同时核心保障区也有云团覆盖影响,防护区域内云团水平尺度较小,分布不均,呈现明显的对流云团特征。14时,防护区西北方向的云团向东发展移动时,追上东北方向的云团,影响整个防护区的北部区域;南部区域的云团也在发展加强。到15时北部的对流云团合并,逐渐完全影响保障区北部区域,同时保障区南部的云团也合并增强影响保障区南部区域,形成南北两条云带,但南部云团只向东移动,不会影响核心保障区。16时,在距离核心保障区20 km西北方向的云团加强,防护区北部云带缓慢减弱东移,南部云带减弱明显。17时核心保障区对流云团自西向东南方向移动,强度维持。北部和南部的主云带持续减弱东移。18时,云团移出核心保障区。分析各时间对流云团的位置和水平分布,可知影响核心保障区的对流云团12时首先在防护区西北方向生成,之后发展加强,自西北向东略偏南移动,移速约为 $30\sim 40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,逐渐影响核心保障区。典型时刻云系分布如图2所示。

2.2 云系结构及微观特征预报

为了分析研究对流云团的垂直结构,我们选择典型时刻的云团进行分析。预报的16时雷达回波(图3a)显示,保障区西北部的对流云团外形近于圆形或椭圆且边缘平滑,总体看云团东西长约70 km,南北宽约30 km,属于 β 中尺度系统,水平分布不均匀,最大雷达反射率达到55 dBz,含有4 mm的垂直累积过冷水(图3b),过冷水分布区域明显小于总体

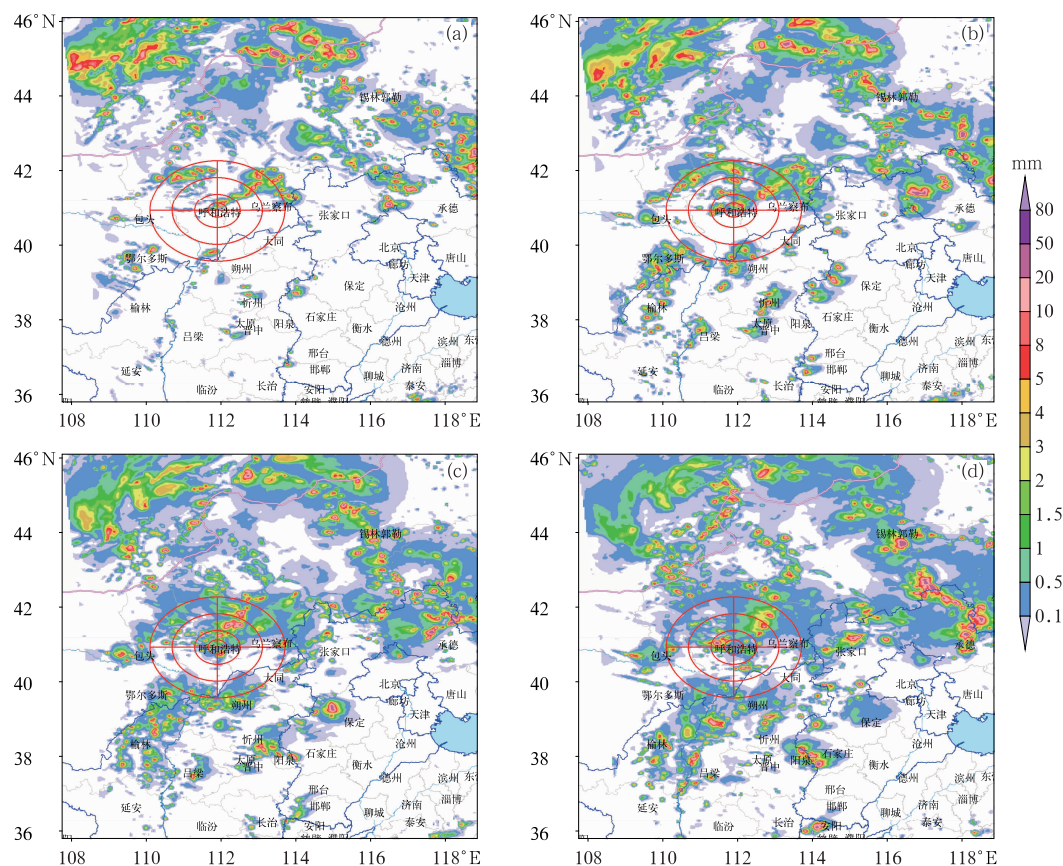


图 2 CPEFS_v1.0 预报 2017 年 8 月 8 日(a)13 时,(b)14 时,(c)15 时,
(d)16 时水平云场分布

(图中红色圆形曲线表示防护区设置,从外向内依次为第一、第二、第三道防线,
中心为野马图核心保障区,半径分别为 20,50,100 和 150 km,下同)

Fig. 2 Forecast horizontal cloud distribution by CPEFS_v1.0 at (a) 13:00 BT,
(b) 14:00 BT, (c) 15:00 BT, (d) 16:00 BT 8 August 2017

(Red circular curves are the protection area; from outside to inside, it is the first, second
and third defence lines; the center of the protection area is the core defence zone of Yematu,
with radius of 20 km, 50 km, 100 km and 150 km respectively, the same below)

云区,主要存在于发展旺盛的对流云团中。

从垂直结构看(图 3c,3d),一个个的对流云团具有冷暖混合云结构,云中上升气流强,发展旺盛的对流云团中冰相水凝物雪、霰含量高,0℃高度以下暖区云水含量少,可以判断出降水主要是由冰相粒子融化产生。700 hPa 以下的中低层相对湿度低,有利于雨滴的下落蒸发。云顶高度超过 200 hPa,达到 10 km 以上,云底高度范围为 2.5~3 km,0℃高度约为 4.3 km,-5℃高度约为 5.1 km,-10℃高度约为 6.0 km,过冷水主要位于-20~0℃,高度范围在 4.3~7.2 km,过冷水最大含量达到 0.7 g·kg⁻¹,过冷水层主导风向为西南风,冰晶数浓度

小于 100 个·L⁻¹。而在对流发展较弱的云区,云中上升气流弱,雪、霰和过冷水含量低,暖区无云水,说明由于高层风的引导,云砧区域远大于雷达回波区域,且回波只集中在冷区,地面没有产生降水。

3 实况云条件分析及预报检验

3.1 实况云系宏观特征及与预报的对比

8 日 11 时卫星反演云特征参量显示,以核心保障区为界,云顶高度大于 7 km、光学厚度大于 20 的对流云团主要分布在核心保障区的西北和西南方

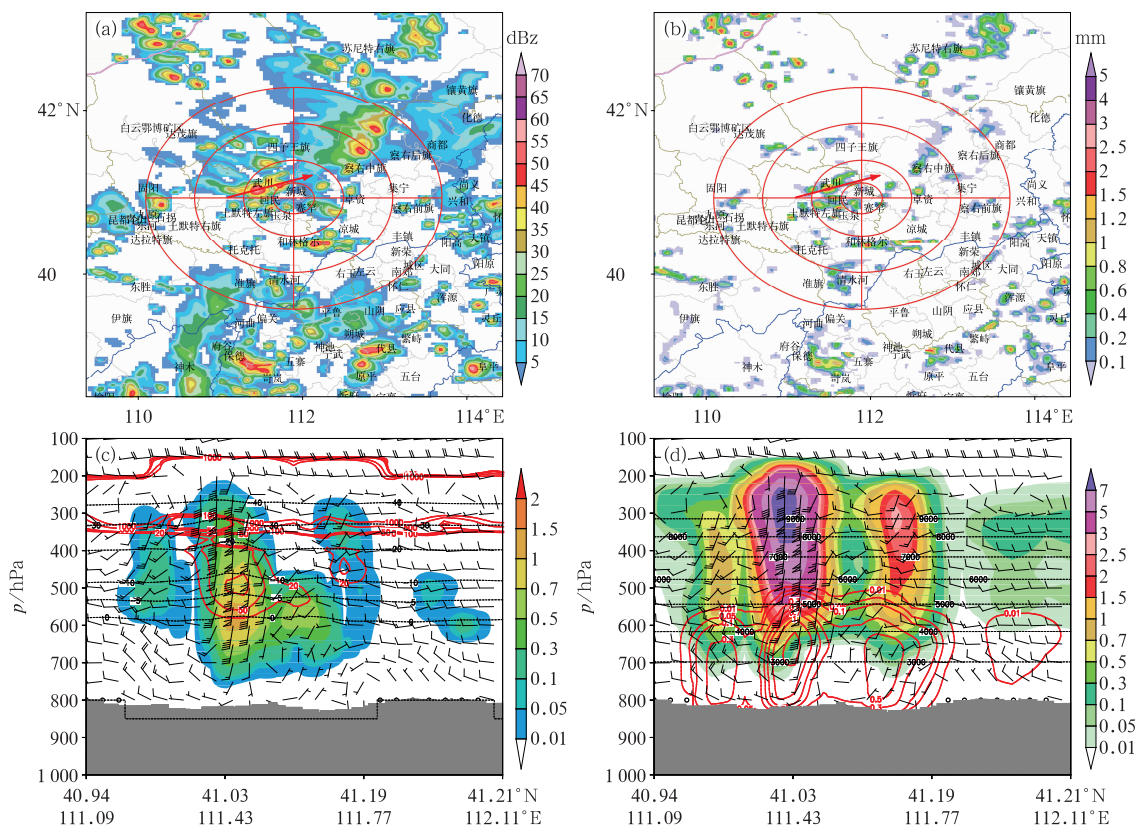


图3 CPEFS_v1.0 预报 2017 年 8 月 8 日 16 时 (a) 组合反射率, (b) 垂直累积过冷水,

(c, d) 沿图 3a, 3b 中红色箭头的垂直剖面: (c) 云水比质量 (填色, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 冰晶数浓度 (红线, 单位: $\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$), 等温线 (黑虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$), 纬向风 u 和垂直运动 ($10w$) 的合成风场 (风向杆, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (d) 雪和霰比质量 (填色, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 雨水比质量 (红线, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 等高线 (黑虚线, 单位: m), 纬向风 u 和垂直运动 ($10w$) 的合成风场 (风向杆, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 3 Forecast clouds at 16:00 BT 8 August by CPEFS_v1.0 (a) composite radar echo,

(b) vertical integration supercooled water, (c) vertical cross-section along the red arrow in Figs. 3a and 3b of cloud-water specific mass (colored, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), number concentration of ice crystal (red contour, unit: L^{-1}), temperature (black dashed line, unit: $^{\circ}\text{C}$), and wind combined by u and $10w$ (black bar, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (d) vertical cross-section along the red arrow in Figs. 3a and 3b of snow and graupel specific mass (colored, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), rainwater specific mass (red contour, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), height (black dashed line, unit: m), and wind combined by u and $10w$ (black barb, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

向, 距离核心保障区约 100 km; 防护区以东的对流云团云顶高度基本小于 7 km, 光学厚度大多数小于 20, 且防护区以东的云系向东向南扩展移动, 不影响防护区 (图略)。故重点分析防护区西北和西南的对流云团。从图 4 可知, 到 12 时, 防护区西北方向的对流云团发展增强, 并自西北向东南扩展移动, 云顶高度大于 7 km、光学厚度大于 20 的对流云团已经影响到核心保障区, 而位于防护区西南方向的对流云团强度维持, 位置少变。到 13 时, 防护区西北方向的对流云团进一步发展加强, 云顶高度大于 9 km

的云区已经扩展移动到防护区东北方向, 并略有南压, 与防护区西南方向的对流云团合并。14 时, 合并后的对流云团逐渐移出防护区西北方向, 继续向东扩展并南压, 强度维持, 范围增大。15 时, 对流云团继续东移南压, 云顶高度依旧大于 9 km。到 16 时, 对流云团基本移出核心保障区, 强度逐渐减弱。总体看来, 11—16 时, 对流云团在防护区西北方向生成并不断发展加强, 东移南压影响核心保障区, 移动速度约为 $40 \sim 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

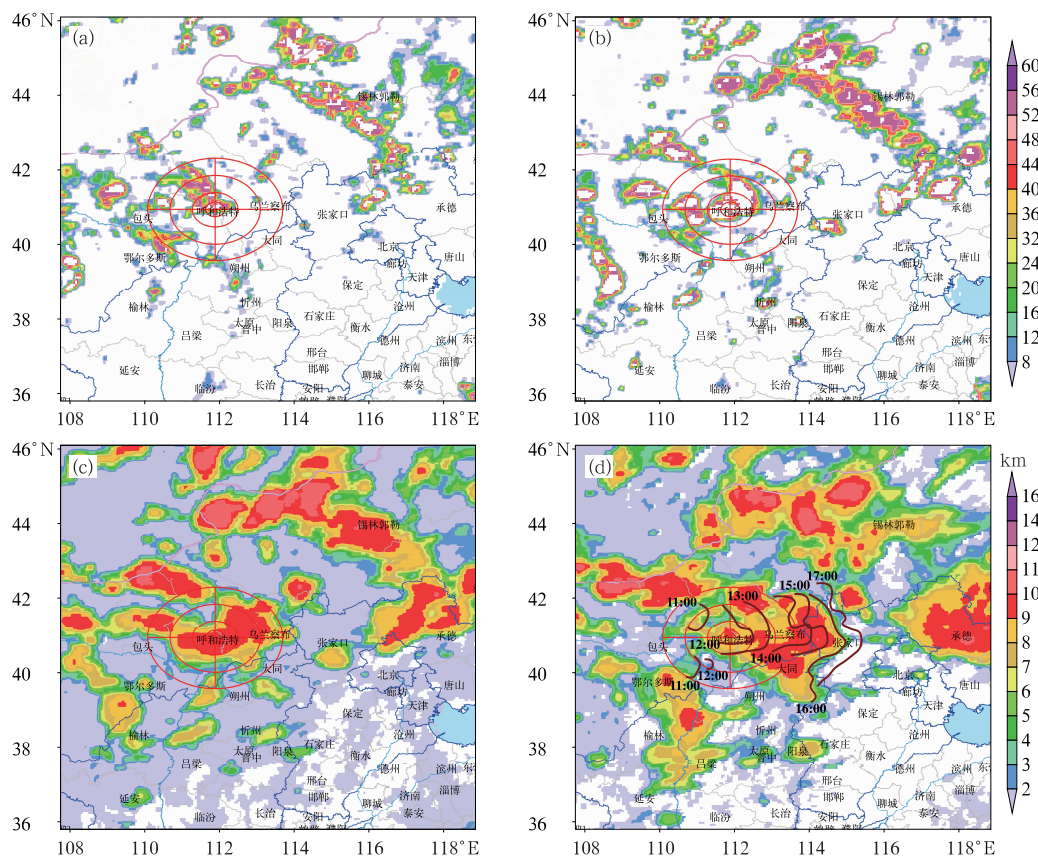


图 4 2017 年 8 月 8 日(a)12 时,(b)13 时,(c)14 时,(d)16 时的

FY-2 反演(a,b)云光学厚度和(c,d)云顶高度

(图 4d 中棕色曲线代表 11—17 时云顶高度大于 7 km 的云系前沿位置)

Fig. 4 FY-2 retrieval (a, b) cloud optical thickness and (c, d) cloud top height at (a) 12:00 BT, (b) 13:00 BT, (c) 14:00 BT, (d) 16:00 BT 8 August 2017

(In Fig. 4d, brown curve represents the front position of cloud system whose cloud top height was greater than 7 km from 11:00 BT to 17:00 BT)

呼和浩特 C 波段雷达显示,11 时许,在距离核心保障区 20 km 以外,呼和浩特市西北方向的武川境内生成多块分散的对流回波单体,回波单体外形近于圆形或椭圆,水平尺度约为 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$,强度最大达到 50 dBZ(图 5a)。12—13 时,回波逐步逼近核心保障区,回波水平分布不均匀,主体强度为 10~35 dBZ,在成片的回波中有多个强中心,局地回波较强,强度最大约为 45 dBZ,对流云特征明显。14 时后,在核心保障区的西北方向约 40 km 处武川境内又生成小块对流回波单体,回波单体在东移过程中合并加强,逐渐连成片状回波,形成对流云团,到 15 时左右对流云达到最强(55 dBZ,图 5b),之后快速减弱,生命史约为 2 h。雷达回波垂直剖面显示,回波顶高接近 10 km,回波接地,强中心柱状回波尺度约为 15 km 宽。16 时之后,呼和浩特周边 60 km 范围

内,回波强度基本小于 30 dBZ,降水趋于结束。

通过上述对于预报和实况分析可知,预报和卫星、雷达实况监测的云系均显示为水平分布不均的对流云团,对流云团在防护区西北方向生成,之后发展加强并向东略偏南方向移动影响核心保障区,预报较好地给出了 8 日对流云系的性质及移动方向。但预报云系的出现时间比实况云系偏晚约 1~2 h,移动速度比实况云系的移动速度偏慢约 $10 \sim 20\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。实况与预报影响核心保障区云系特征量对比见表 1。

总体看来,在有利的动力、不稳定层结和水汽供应下,8 日白天呼和浩特周边不断有分散性回波单体生成,并快速发展成为强度超过 45 dBZ 的强回波,提前 24 h 准确预报回波单体的生成时间、区域位置和发展演变极其困难。

表 1 预报和实测影响核心保障区云系宏观特征统计

Table 1 Macro and micro characteristics of cloud system affected the core protection area by forecast and observation

云系特征	预报	实况
云系性质	对流云	对流云
对流云初生区域	防护区西北方向	防护区西北方向
对流云初生时间	8 日 12 时左右	8 日 11 时左右
对流云影响结束时间	8 日 18 时左右	8 日 16 时左右
云系移动方向	自西北向东略偏南	自西北向东略偏南
云系移动速度/(km·h ⁻¹)	30~40	40~60
云顶高度范围/km	>10	>9
云底高度范围/km	2.5~3.0	3.3
最大雷达回波强度/dBz	55	约 55
最大过冷水含量	0.7 g·kg ⁻¹	0.6 g·m ⁻³

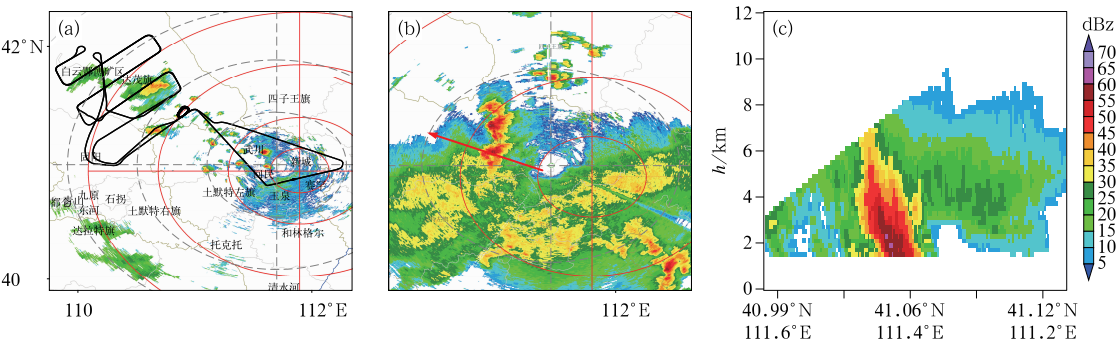


图 5 2017 年 8 月 8 日呼和浩特雷达组合反射率

(a)10:58 叠加 B-3435 飞机飞行轨迹,(b)15:04,(c)沿图 5b 中红色箭头的垂直剖面

Fig. 5 Hohhot radar composite reflectivity on 8 August 2017

(a) 10:58 BT with B-3435 flight trajectory, (b) 15:04 BT, (c) vertical section along red arrow in Fig. 5b

蔡森等(2014)研发了适合我国 L 波段探空秒数据的云垂直结构判别方法并开发了相关的应用软件系统。根据该方法 8 月 8 日呼和浩特的探空资料(图 6)表明,08 时呼和浩特为多层云,在 1.5 km 高度附近有一层厚度约 190 m 的浅薄云层,云下有明显的逆温层存在,逆温层抑制水汽和热量的垂直交换,便于低层储存大量的不稳定能量,随着太阳辐射升温,逆温层遭到破坏,容易产生对流性天气。在 0℃层以上的冷区,有厚度约 1.7 km 的中云覆盖。14 时呼和浩特演变为两层云,在 1.2 km 高度附近有一层厚度约 40 m 的浅薄云层,主体云系的云底高度为 3.3 km,云顶高度约为 10 km,云体厚度近 6.7 km,云顶温度约为-40℃左右。700 hPa 以下的低层仍然比较干燥。到 20 时降水过后,呼和浩特演变为与 08 时比较相像的层结曲线。

预报云顶高度超过 10 km,云底高度为 2.5~3.0 km,云底之下相对湿度小。预报云顶、云底高度与实况探测一致,同时也较好地预报了低层比较干

燥这一有利于消减雨作业的环境特征。预报中给出的 0℃高度约为 4.3 km,-10℃高度约为 6.0 km,与 08—14 时探空给出的特征温度层高度基本一致,-20℃层高度预报偏低约 350~400 m,温度对比见表 2。

表 2 呼和浩特站探空和预报的特征温度层高度对比

Table 2 Comparison of characteristic temperature layer height between sounding and prediction at Hohhot Station

实况/预报	0℃层高度/m	-10℃层高度/m	-20℃层高度/m
08 时	4 296	5 681	7 541
14 时	4 255	5 981	7 594
20 时	4 150	6 199	7 606
预报	4 300	6 000	7 200

3.2 机载探测分析及预报微观云场检验

8 日 09:53—14:43,新舟 B-3435 高性能飞机在防护区西北部开展了探测和作业飞行(飞行轨迹见图 5a),自 3 600~6 300 m 垂直盘旋上升,每 300 m

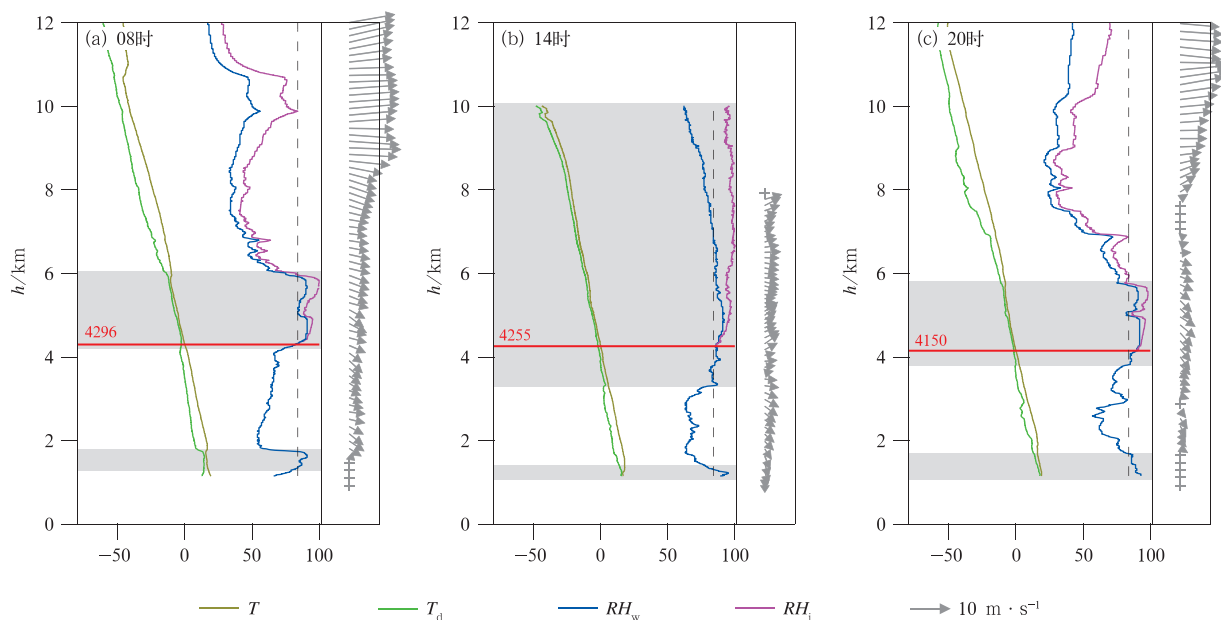


图 6 2017 年 8 月 8 日 (a) 08 时, (b) 14 时, (c) 20 时呼和浩特站探空分析
(阴影区域代表云区, 水平红线为 0°C 高度)

Fig. 6 Sounding analysis of Huhhot Station at (a) 08:00 BT, (b) 14:00 BT, (c) 20:00 BT 8 August 2017
(Shaded area is cloud area; horizontal red line is height of 0°C)

一层开展云探测, 区域内有发展旺盛的积云对流, 存在明显的颠簸。在 3 600~4 500 m, 云滴数浓度介于 $45 \sim 600 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 液水含量介于 $0.05 \sim 0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在 5 400 m 高度处温度为 -8°C , 云滴数浓度最大超过 $600 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 云滴粒径为 $17 \sim 20 \mu\text{m}$, 液水含量为 $0.1 \sim 0.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 二维图像表明, 该层的液滴粒子较多, 但冰晶粒子较少。根据陶树旺等 (2001) 利用机载粒子探测资料得到的增雨指标判据分析, 该区域具有可播性, 适宜使用 AgI 催化剂进行冷云播撒作业。

预报过冷水含量最大达到 $0.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比 5 400 m 高度处飞机探测的过冷水含量略大, 但由于飞行区域回波不是最强, 估计实况过冷水含量与预报差异较小。

4 作业预案制定和合理性分析

4.1 作业预案制定

根据上述对云系性质、宏微观结构、垂直结构、移动演变特征等作业云条件的预报分析, 确定催化作业时间、落区、温度和高度范围, 7 日下午制定作业预案并分发外场作业组, 主要考虑飞机探测、作业以及地面作业。

预报对流云团 8 日 12 时在防护区西北方向生

成并向东略偏南移动, 故重点布防区设置在核心保障区的偏西方向 (图 7), 蓝色实线椭圆区为飞机探

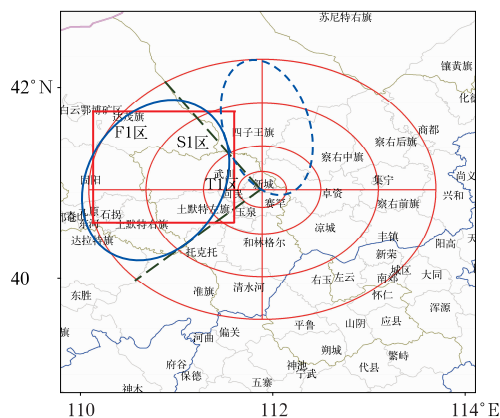


图 7 2017 年 8 月 8 日探测和作业预案示意图

(绿色虚线与红色圆形形成的区域为重点关注和探测作业区域, 最外圈为第一道防线 F1 区, 第二道防线为 S1 区, 第三道防线为 T1 区; 蓝色实线椭圆区为飞机探测和作业区, 红色实线的矩形框为地面作业区域, 蓝色虚线椭圆区域为关注区)

Fig. 7 Sketch map of detection and operation plan on 8 August 2017

(The area formed by green dashed line and red circle is the main focus and detection area; the outermost circle is the first defense area, named F1 area; the second circle is S1 area, and the third circle is T1 area; the blue solid line ellipse area is the aircraft detection and operation area, the red solid line rectangular frame is the ground seeding operation area, and the blue dashed line ellipse area is the concern area)

测和作业区,建议飞机在 8 日上午选择回波强度小于 25 dBz 的弱回波区域、第一道防线为主的 F1 区开展探测和冷云播撒作业,考虑到新舟 B-3435 高性能增雨飞机的性能,预案中给出的探测高度介于 4 000~7 000 m,即云底以上的过冷水大值区开展探测,催化高度介于 5 100~7 000 m,即-20~-5℃范围内开展冷云作业。预报云系移动速度为 30~40 km·h⁻¹,故对于地面作业,选择红色实线矩形框中距离核心保障区 50 km 范围内的第三道防线为主的 T1 区,在开幕式活动前对流回波初生阶段 5 100~7 000 m 的高度范围内,利用火箭实施过量 AgI 播撒作业,达到消减雨作业的目标。蓝色虚线区域为关注区,建议关注该区域内实况云系的发展演变,加强监测。

4.2 作业预案合理性分析

作业预案中指出,核心保障区的偏西方向为重点布防区,探测、催化作业时段为 8 日上午到庆祝活动结束前,催化作业高度介于 5 100~7 000 m,采用 AgI 开展冷云催化作业。在第一道防线为主的 F1 区的弱回波区域开展飞机探测和冷云播撒作业,在第三道防线为主的 T1 区、对流回波初生阶段实施地面火箭过量播撒作业。

新舟 B-3435 飞机于 8 日 09:53—14:43 在防护区西北第一道防线为主的区域开展了探测和作业飞行(飞行轨迹见图 5a),作业高度为 5 400 m,采用了 AgI 播撒,作业时间、区域位置、高度、温度与预案中一致。

根据作业预案,内蒙古人工影响天气中心 7 日下午在防护区西北方向第三道防线内武川县大豆铺乡镇、安子号乡镇周边增设 5 个移动作业点(图 8)。

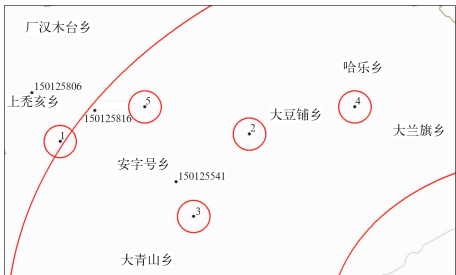


图 8 第三道防线新增移动作业点示意图
Fig. 8 Sketch map of new established mobile operation points on the third defence area

8 日 13 时左右,核心保障区西西南方向出现局地生成的带状强回波,自西向东移动。在第一、二道防线保障区西北侧(a 区)及保障区西南侧方向(b 区)开展地面消减雨作业(图 9)。14:24 保障区西北方向武川县境内出现分散性强回波单体,在短时间内合并、增强移向核心保障区,利用临时增设的移动作业点(c 区),对分散性强回波单体开展消减雨作业(图 9)。上述 3 个区域地面作业催化剂用量详见表 3。

这 3 个地面作业区域都在预案中设定的地面作业范围之中,在临近重点保障时段 2 h 内开始集中作业,尤其是根据云条件预报在第三道防线新增设了 5 个地面作业点,如果没有这些新增的作业点,对

表 3 2017 年 8 月 8 日 13:00—16:40 核心保障区西侧地面作业情况统计

Table 3 Statistis of ground operation on the west side of the core defence area in 13:00—16:40 BT 8 August 2017

作业量	a 区	b 区	c 区
作业轮次	5	46	13
高炮弹用量/发	34	850	95
火箭弹用量/枚	20	30	60

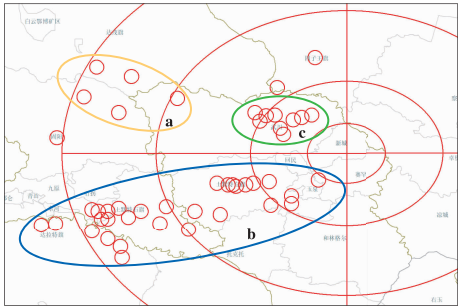


图 9 核心保障区西侧 2017 年 8 月 8 日开展作业的地面站点分布示意图
(a:第一、二道防线保障区西北侧,b:保障区西南侧,c:第三道防线西北侧;
其中最小的红色圆圈为以作业点为中心半径 8 km 区域,代表作业可能影响范围)

Fig. 9 Sketch map of operation points on the west side of the core defence area on 8 August 2017
(a: northwest side of the first and second defence zones, b: southwest side the defence zone, c: northwest side of the third defence zone; in which the smallest red circle is an area with the operation point as the center radius of 8 km, representing possible operation effect range)

14:24—15:30 出现在武川境内的强回波将无法开展消减雨作业。可见预案给出的作业时段、区域、高度范围,以及催化剂、催化方式选择合理,根据预案临时在武川县境内增设的移动作业点为集中开展消减雨作业奠定了基础,提前 24 h 开展作业云条件预报和预案制定为固定目标区消减雨作业提供了强有力的技术支持。

以 25 dBz 为阈值识别强回波单元,利用雷达资料时空变化追踪作业回波发展,并分析各回波物理参量的时间演变。从图 10 可知,8 日 13 时左右保障区西西南侧出现带状强回波,13:58 中心最大回波强度超过 55 dBz,回波顶高近 10 km。在强回波自西向东移动过程中,在第二道和第三道防线附近 b 区开展了大量的地面火箭、高炮作业。受作业影响,带状强回波在移动过程中逐渐减弱、分裂。14:24 起,保障区西北侧不断有局地对流回波形成且逐渐增强,在自西向东移动过程中与其南侧回波合并后强回波面积略有增加,组织作业力量在 a 区、c 区开展地面火箭、高炮作业。作业后回波强度减

小,强回波面积略有增加。从回波单元各物理参量时间演变(图 11)可以看出,伴随着武川县境内局地对流的生成(14:24),回波顶高和积分液水含量(VIL)明显增大,14:50—15:10 对流单体自西向东移动过程中与南侧回波合并发展,最大反射率稍有增加但回波顶高和 VIL 变化不大;15:00—15:30 为地面集中作业时段,作业后雷达回波分裂且逐渐减弱,雷达回波各物理参量也迅速减小。

综上雷达回波发展演变的直观分析,初步认为针对保障区西西南侧带状回波(b 区共消耗高炮炮弹 850 发、火箭弹 30 枚)开展地面消减雨作业后,回波团逐渐减弱分裂,部分分裂后的回波单体逐渐消散,最大回波强度由 55 dBz 降至约 30 dBz。针对保障区西北侧武川县境内局地生成对流单体(a 区、c 区共消耗高炮炮弹 129 发、火箭弹 80 枚)开展地面消减雨作业后,回波团经历先发展后合并,之后略有减弱的过程,强回波面积略有减弱,但最大回波强度无明显变化(约 55 dBz)。产生这种差异的原因可能与作业剂量有关,还需下一步开展针对性研究。

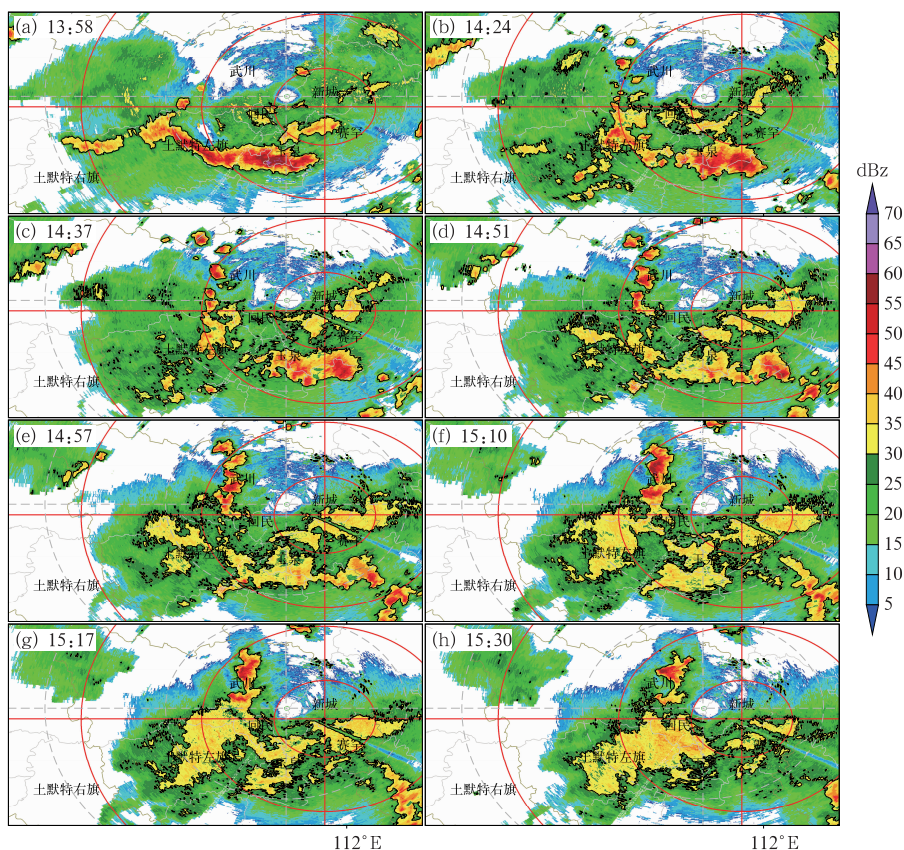


图 10 2017 年 8 月 8 日 13:58—15:30 呼和浩特雷达组合反射率

Fig. 10 Hohhot Radar composite reflectivity in 13:58—15:30 BT 8 August 2017

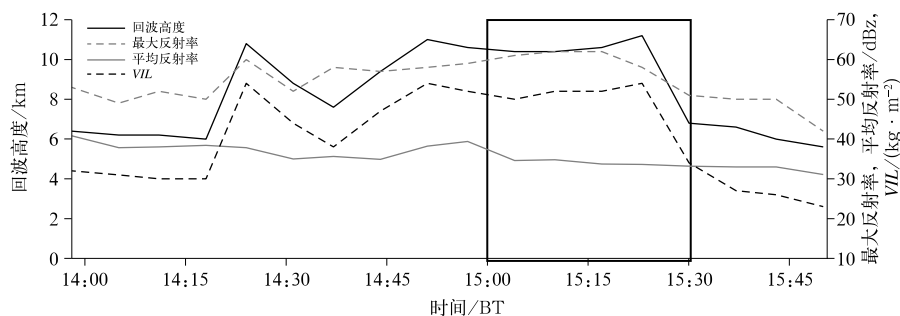


图 11 2017 年 8 月 8 日以 25 dBz 为阈值追踪雷达回波单元各物理参量随时间的变化
(方框为作业集中时段)

Fig. 11 Time variation of radar physical parameters using 25 dBz as a threshold on 8 August 2017
(Box is the period of operation)

5 结论和讨论

为了做好固定目标区消减雨作业,本文利用 CPEFS_v1.0 模式系统开展了 2017 年 8 月 8 日的作业云条件预报和作业预案制定,利用卫星、雷达、机载探测资料分析实况云降水特征及演变,对云条件预报进行检验,对作业预案进行合理性分析,主要得到如下结论:

(1) 8 日上午分散性对流单体在防护区不断地生成并快速发展,初生在防护区西北方向的对流云团东移略南压影响核心保障区,水平尺度约几十千米,回波顶高 10 km,对流单体生命史约为 1.5~3 h,预报云系的性质、对流云系的移向与实况一致,生成时间偏晚 1~2 h,移速偏慢 $10\sim 20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

(2) 预报对流云团具有冷暖混合云结构,云中上升气流大,冰相水凝物雪、霰含量高,暖区云水含量少,700 hPa 以下的中低层相对湿度低,云顶高度约为 10 km、云底高度约为 2.5~3.0 km,0℃ 高度约为 4.3 km,过冷水最大含量达 $0.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,过冷水丰沛区域冰晶含量低,与卫星反演云顶高度、雷达、探空及机载探测结果基本一致。

(3) 作业预案中给出重点布防区在核心保障区的偏西方向,催化作业高度介于 5100~7000 m。8 日上午飞机在第一道防线的弱回波区开展探测作业,地面作业集中在第三道防线对流云初生阶段实施过量 AgI 播撒,达到消减雨作业的目标。作业预案中给出的重点布防区、作业时间、高度、催化方式与实际作业一致。7 日下午临时增设的 5 个地面移动作业点为 8 日开展消减雨作业增援了装备能力。

总体看来,本次对流云消减雨作业云条件预报较为理想,制定的作业预案有利于作业装备的优先部署和临时调配,为固定目标区消减雨作业提供了有效防护。但考虑到目前中尺度数值模式预报能力,应该加强卫星、雷达等对云降水的监测和临近跟踪监测,为临近作业方案的修正提供科学依据。目前消减雨作业处于探索尝试阶段,什么样的云适合开展消减雨作业,可以取得什么样的效果,可实施消减雨作业的时间窗口是什么,科研积累还远远不够,风险高,难度大,消减雨作业并不一定能使核心保障区真正不受降雨的影响,尤其是对于发生在核心保障区的云降水系统,更是由于作业条件限制而无法开展人影作业。

今后需要对 CPEFS 模式系统预报产品进行不同天气类型降水过程预报效果总结凝练,提炼相应的预报技术指标体系,切实提高云条件预报水平和预案制定精细服务能力。

参考文献

- 蔡森,欧建军,周毓荃,等,2014. L 波段探空判别云区方法的研究[J]. 大气科学,38(2):213-222. Cai M, Ou J J, Zhou Y Q, et al, 2014. Discriminating cloud area by using L-band sounding data [J]. Chin J Atmos Sci, 38(2):213-222(in Chinese).
- 高文华,赵凤生,胡志晋,等,2012. CAMS 云微物理方案的改进及与 WRF 模式耦合的个例研究[J]. 地球物理学报,55(2):396-405. Gao W H, Zhao F S, Hu Z J, et al, 2012. Improved CAMS cloud microphysics scheme and numerical experiment coupled with WRF model[J]. Chin J Geophys, 55(2):396-405(in Chinese).
- 何晖,马建立,2008. 人工消减雨作业雷达回波特征综合分析[J]. 气象,34(S1):145-149. He H, Ma J L, 2008. Comprehensive analysis of radar echo characteristics for artificial rain mitigation [J]. Meteor Mon, 34(S1):145-149(in Chinese).

- 何晖, 金华, 李宏宇, 等, 2012. 2008 年奥运会开幕式日人工消减雨作业中尺度数值模拟的初步结果[J]. 气候与环境研究, 17(1): 46-58. He H, Jin H, Li H Y, et al, 2012. Preliminary study of the mesoscale numerical simulation of the rain mitigation operation during the opening ceremony of the 2008 Beijing Olympic Games[J]. Clim Environ Res, 17(1): 46-58(in Chinese).
- 胡志晋, 严采繁, 1986. 层状云微物理过程的数值模拟(一)微物理模式[J]. 气象科学研究所院刊, 1(1): 37-52. Hu Z J, Yan C F, 1986. Numerical simulation of microphysical processes in stratiform clouds (I)—microphysical model[J]. J Appl Meteor Sci, 1(1): 37-52(in Chinese).
- 刘涛, 孙晶, 周毓荃, 等, 2015. 一次低槽冷锋层状云系结构和过冷水分布特征的模拟研究[J]. 气象, 41(10): 1232-1244. Liu T, Sun J, Zhou Y Q, et al, 2015. Simulation study on stratiform cloud structure of trough cold front and characteristics of supercooled water distribution[J]. Meteor Mon, 41(10): 1232-1244(in Chinese).
- 楼小凤, 2002. MM5 模式的新显式云物理方案的建立和耦合及原微物理方案的对比分析[D]. 北京: 北京大学, 127. Lou X F, 2002. Development and implementation of a new explicit microphysical scheme and comparisons of original scheme of MM5[D]. Beijing: Peking University, 127(in Chinese).
- 楼小凤, 孙晶, 史月琴, 等, 2014. 减弱对流云降水的 AgI 催化原理的数值模拟研究[J]. 气象学报, 72(4): 782-793. Lou X F, Sun J, Shi Y Q, et al, 2014. Numerical study of the AgI seeding principle for decreasing the convective cloud rainfall[J]. Acta Meteor Sin, 72(4): 782-793(in Chinese).
- 毛冬艳, 朱文剑, 樊利强, 等, 2014. GRAPES_Meso V3.3 模式强天气预报性能的初步检验[J]. 气象, 40(12): 1429-1438. Mao D Y, Zhu W J, Fan L Q, et al, 2014. Preliminary synoptic verification on the performance of GRAPES_Meso V3.3 in severe weather forecasting[J]. Meteor Mon, 40(12): 1429-1438(in Chinese).
- 倪思聪, 魏鸣, 2018. 2014 年 8 月南京青奥会开幕式人工减雨作业回波分析[J]. 气象科学, 38(1): 104-112. Ni S C, Wei M, 2018. Echo analysis on artificial reducing rain operation during the opening ceremony of the Youth Olympic Games in August 2014 of Nanjing[J]. J Meteor Sci, 38(1): 104-112(in Chinese).
- 潘雯菁, 吴奕霄, 周嘉健, 等, 2019. 南京青奥会开幕式期间人工减雨作业对雨滴谱的影响分析[J]. 气象科学, 39(2): 237-246. Pan W J, Wu Y X, Zhou J J, et al, 2019. Impact analysis for artificial rain reduction operation on raindrop spectrum of the opening ceremony of the Youth Olympic Games in Nanjing[J]. J Meteor Sci, 39(2): 237-246(in Chinese).
- 史月琴, 楼小凤, 邓雪娇, 等, 2008. 华南冷锋云系的中尺度和微物理特征模拟分析[J]. 大气科学, 32(5): 1019-1036. Shi Y Q, Lou X F, Deng X J, et al, 2008. Simulations of mesoscale and microphysical characteristics of cold front clouds in South China[J]. Chin J Atmos Sci, 32(5): 1019-1036(in Chinese).
- 孙晶, 史月琴, 蔡森, 等, 2015. 南方三类云系云结构预报和增雨作业条件分析[J]. 气象, 41(11): 1356-1366. Sun J, Shi Y Q, Cai M, et al, 2015. Analysis on cloud structure forecast and seeding conditions of 3 types of cloud system in South China[J]. Meteor Mon, 41(11): 1356-1366(in Chinese).
- 孙晶, 史月琴, 楼小凤, 等, 2010. 人工缓减梅雨锋暴雨的数值试验[J]. 大气科学, 34(2): 337-350. Sun J, Shi Y Q, Lou X F, et al, 2010. Numerical experiments on artificial seeding of decreasing the Meiyu heavy rainfall[J]. Chin J Atmos Sci, 34(2): 337-350(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).
- 叶家东, 1993. 关于人工抑制暴雨问题[J]. 南京气象学院学报, 16(3): 373-378. Ye J D, 1993. On the possibility of artificial suppression of heavy rains[J]. J Nanjing Inst Meteor, 16(3): 373-378(in Chinese).
- 张慧娇, 2018. 南京青奥会开幕式人工催化消减雨作业的效果和机理研究[D]. 南京: 南京大学硕士学位论文. Zhang H J, 2018. Study on the effect and mechanism of mitigating or suppressing precipitation by cloud seeding on opening ceremony of Nanjing Youth Olympic Games[D]. Nanjing: Nanjing University Master Dissertation.
- 张纪淮, 王广河, 关立友, 等, 2005. 人工消雨[M]//中国气象学会大气物理委员会. 第十四届全国云降水物理和人工影响天气科学会议. 北京: 气象出版社: 611-620. Zhang J H, Wang G H, Guan L Y, et al, 2005. Artificial rain mitigation[M]//Atmospheric Physics Committee of China Meteorological Society. 14th National Conference on Cloud and Precipitation Physics and Weather Modification (Volume 1). Beijing: China Meteorological Press: 611-620(in Chinese).
- 张蕾, 何晖, 刘建忠, 等, 2009. 北京 2008 年奥运会开幕式人工消减雨作业[J]. 气象, 35(8): 3-15. Zhang Q, He H, Liu J Z, et al, 2009. Brief introduction of rain mitigation operation during Beijing 2008 Olympic Opening Ceremony[J]. Meteor Mon, 35(8): 3-15(in Chinese).
- 周毓荃, 蔡森, 欧建军, 等, 2011. 云特征参数与降水相关性的研究[J]. 大气科学学报, 34(6): 641-652. Zhou Y Q, Cai M, Ou J J, et al, 2011. Correlation between cloud characteristic parameters and precipitation[J]. Trans Atmos Sci, 34(6): 641-652(in Chinese).
- Hu Z J, He G F, 1988. Numerical simulation of microphysical processes in cumulonimbus—Part I: microphysical model[J]. Acta Meteor Sin, 2(4): 471-489.
- Lou X F, Shi Y Q, Sun J, et al, 2012. Cloud-resolving model for weather modification in China[J]. Chin Sci Bull, 57(9): 1055-1061.
- Lovasich J L, Neyman J, Scott E L, et al, 1971. Further studies of the whitetop cloud-seeding experiment[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 68(1): 147-151.