

李宏宇, 马建立, 马永林, 等. 2011. 北京 2008 年奥运会开幕日云、降水特征及人工影响天气作业分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (2): 175–187. Li Hongyu, Ma Jianli, Ma Yonglin, et al. 2011. Characteristics of cloud-precipitation and the impact of weather modification activities on the opening day of the Beijing 2008 Olympics [J]. Climatic and Environmental Research (in chinese), 16 (2): 175–187.

北京 2008 年奥运会开幕日云、降水特征 及人工影响天气作业分析

李宏宇¹ 马建立¹ 马永林² 陶玥³

1 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089

2 云南省楚雄州气象局, 楚雄 675000

3 中国气象科学研究院人工影响天气中心, 北京 100081

摘 要 2008 年奥运会开幕日当天北京及周边地区出现了较强对流云团, 尤其是西南和东北两个方向云体发展旺盛, 并且向北京城区形成“合围”之势, 给国家体育场内开幕式活动的顺利进行带来了极大威胁。根据天气实况, 北京市有针对性地组织实施了大规模地面火箭人工消减雨作业。利用自动气象站雨量监测、雷达云和降水探测以及卫星资料反演的云特征参量, 通过对奥运会开幕式活动期间云、降水主要特征及人工消减雨作业的物理响应分析, 结果显示: 2008 年 8 月 8 日傍晚至夜间北京西南和东北部郊区(县)对流发展较强, 19 时(北京时间, 下同)至 23 时降水集中分布于北京房山区与怀柔区、密云县一带。北部—东北部对流云团和雨带在向东北方向缓慢移出过程中曾出现西伸、南压现象, 西南部对流云团在进入房山区后其主体移动缓慢, 雨区向东偏北移动并威胁到城区和国家体育场, 最后云团沿东南方向逐渐移出北京市。结合地面火箭作业的时间、空间分布, 通过对目标区内自动气象站雨量、雷达回波探测和卫星资料反演的云、降水宏观特征参量变化分析均表明, 大规模和高强度的火箭引晶作业对抑制云、降水的形成和发展起到了一定作用。

关键词 奥运会 云和降水 人工影响天气

文章编号 1006-9585 (2011) 02-0175-13 **中图分类号** P481 **文献标识码** A

Characteristics of Cloud-Precipitation and the Impact of Weather Modification Activities on the Opening Day of the Beijing 2008 Olympics

LI Hongyu¹, MA Jianli¹, MA Yonglin², and TAO Yue³

1 *Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089*

2 *Chuxiong Meteorological Bureau, Chuxiong 675000*

3 *Weather Modification Center, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

Abstract Strong convective clouds existed in Beijing and its surrounding areas during the opening ceremony of the 2008 Olympic Games. Clouds developed vigorously especially in the directions of southwest and northeast. They moved towards Beijing city zone and an encirclement trend was formed. Such impending clouds and precipitation posed a significant threat to the ongoing ceremony activities at the National Stadium. According to the actual weather condition, weather modification organizations implemented cloud seeding operations by firing lots of special rock-

收稿日期 2009-10-16 收到, 2010-05-27 收到修定稿

资助项目 国家科技支撑计划重点项目 2006BAC12B07

作者简介 李宏宇, 男, 博士, 高级工程师, 主要从事云和降水物理学研究。E-mail: lihy@bjmb.gov.cn

ets to mitigate or suppress precipitation. Using the rainfall data of automatic weather stations, radar detection of clouds and precipitation, and two cloud parameters retrieved from satellite data, the authors analyzed the main characteristics of cloud-precipitation together with some physical evidence from weather modification activities during the period of the opening ceremony. The results displayed that strong convection developed in the southwest and northeast outskirts of Beijing in the evening and night on 8 Aug 2008. From 1900 LST to 2300 LST, precipitation was concentrated in Fangshan district and Huairou, Miyun county of Beijing. Strong convective clouds and the followed rainfall distribution in the north and northeast mainly moved slowly towards northeast. There also occurred a bit extending to the west and south. In the southwest, convective clouds stepped slowly after they entered into Fangshan district. The rainfall distribution moved toward northeast and posed a serious threat to the city zone and the National Stadium. Then the main body of it moved slowly toward southeast and finally away from Beijing. Combining with the sites distribution of ground-based rocket launchers and the operation time of cloud seeding, some changes of the macro-micro characteristics of cloud and precipitation derived from automatic weather stations' rainfall, radar detection, and satellite data retrieval showed that the intense large scale firing rockets and seeding clouds with AgI had played a certain role in inhibiting the formation and development of cloud and precipitation in the target area.

Key words Olympic Games, cloud and precipitation, weather modification

1 引言

云雨转变过程中, 针对云微物理不稳定过程, 通过释放少量催化剂促使宏观天气向一定方向演变是可能的, 在某些条件下还可取得一些比较明显的效果 (Schaefer, 1946; 黄美元等, 2003; 雷恒池等, 2008)。利用人工影响天气技术不仅可增加局部地区的降水, 还可以用于抑制云和降水的发展或减少目标区降水, 改变降水分布, 从而改善城市和特定地区的天气以满足实际需要, 亦即通常所说的人工消减雨。它是人工影响天气技术的延伸和扩展, 其服务对象主要是大城市的露天活动, 如重大节日庆典、大型运动会开 (闭) 幕式、大型联欢会和文艺演出等。主要手段是基于播云静力催化和动力催化综合方法, 在影响保护区的降水云系上风方, 对其进行大规模、连续催化作业以设法改变其降水分布, 使保护区内无雨或出现小雨空隙 (张纪淮等, 2005)。作为一项重要的公共气象服务内容, 人工消减雨有着特殊的巨大的社会效益, 并且日益受到人们关注。

长期以来, 在人工影响天气领域不断开展了关于人工消云、消雨及在上风方拦截先期发生降水和人工抑制局地暴雨等试验, 并有试验成功的信息报导 (叶家东, 1993; 李大山等, 2002)。尤其是前苏联经过大量外场试验, 取得过比较成功的实例, 也获得了一些可行的技术指标和方法。

至 1980 年代, 基于理论和实验的大量研究, 已形成一整套人工减水或抑制对流云发展的技术方法及手段, 该技术在 1986 年切尔诺贝利核电站事故应用中, 为防止核污染进一步扩散做出了重要贡献。目前国外 (专指俄罗斯) 人工消减雨和抑制对流云作业主要应用于重大节庆活动天气保障, 如庆祝世界反法西斯战争胜利 50 周年、60 周年莫斯科红场阅兵和莫斯科城市日、圣彼得堡建市等庆典 (别拉耶夫等, 1998; Korneev et al., 2003), 以及减少冬季城镇降雪积雪等服务, 并成为了政府及公共部门常用的一项措施, 也是俄罗斯联邦紧急状态部的常备措施。

在我国, 人工消减雨技术仍处于尝试阶段。作为重大活动应急保障措施之一, 国内部分省市根据气象服务需要也组织进行了多次人工消减雨作业。据报导, 1984 年北京国庆 35 周年阅兵、1999 年昆明世界园艺博览会、1999 年北京国庆 50 周年阅兵、2005 年南京第十届全运会以及 2007 年武汉第六届全国城市运动会等开幕式气象保障工作中, 都进行过人工消云或消减雨作业, 通过试验也获得了一些初步的组织经验, 但在技术层面上尚缺乏足够积累。在借鉴了俄罗斯人工消减雨技术与经验后, 目前对该项技术的运用已经得到一定程度提高, 但总体上来说国内外在该方面做的工作很少, 公开发表的科研报告及论文极为有限。

北京 2008 年奥运会期间, 正值北方盛夏和主

汛期, 天气系统复杂多变, 强对流和暴雨等强天气发生的概率很高(朱燕君等, 2006)。为全力做好奥运会开幕式气象保障服务工作, 确保开幕式不受降雨等不利天气的影响, 早在 2002 年北京市气象部门就开展了针对奥运会开、闭幕式的人工消减雨专项研究, 针对不同类型云和降水组织进行了多次人工消减雨科学试验。通过双边科技合作交流还深入学习和了解了俄罗斯在人工影响天气方面的先进技术与经验。在 2008 年 8 月 8 日奥运会开幕式活动当日, 北京市根据天气实况组织实施了有历史意义的一次大规模人工消减雨保障工作。本文即通过对奥运会开幕式活动期间气象监测资料分析, 并结合北京西南部地面火箭集中作业实际情况, 初步探讨云和降水基本特征以及人工消减雨作业的物理效果。

2 资料与方法

2.1 AWS (Automatic Weather Station) 自动气象站加密雨量

北京市地面自动气象站网目前总数达 187 个(见图 1), 其中, 加密观测自动气象站 168 个, 包括六要素自动站(温度、湿度、气压、风向、风速、降水) 88 个, 四要素自动站(温度、风向、风速、降水) 45 个, 两要素自动站(温度、降水) 27 个, 六要素以上自动气象站 8 个。从而形成了一个间距在 3~5 km 左右的中尺度监测网, 在时空尺度上基本满足对中小尺度天气的监测和预报需求。

2.2 CINRAD/SA 多普勒天气雷达反射率因子

北京市新一代多普勒天气雷达 CINRAD/SA 位于南郊大兴区的观象台。在雷达基本产品中, 雷达基本反射率产品——等高平面位置显示 CAP-PI (Constant Altitude Plane Position Indicator) 和距离高度显示 RHI (Range Height Indicator) 能够反映气象目标内部降水粒子的尺度和密度分布, 用来表示气象目标的强度(单位: dBZ); 组合反射率产品(CR) 是雷达体积扫描中将最大反射率投影到笛卡尔格点上的产品。文中分析时将组合反射率回波强度 Z 主要分 5 个强度级别(即: $Z < 15$ dBZ; $15 \text{ dBZ} \leq Z < 30$ dBZ; $30 \text{ dBZ} \leq Z < 45$ dBZ; $45 \text{ dBZ} \leq Z < 60$ dBZ; $Z \geq 60$ dBZ) 进行

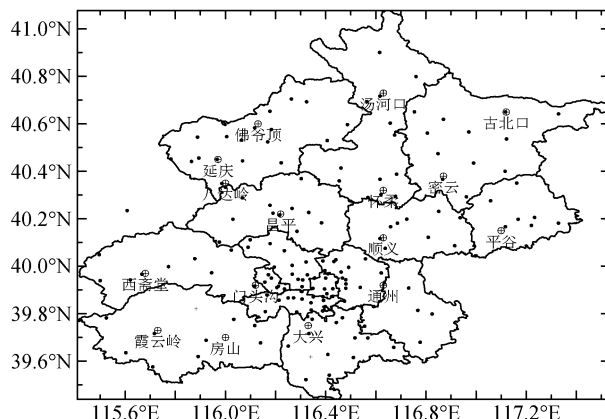


图 1 北京市自动气象站网布局

Fig. 1 Distribution of the AWS (Automatic Weather Station) in Beijing

统计。资料时间间隔为 6 分钟, 空间分辨率 1 km。

2.3 FY-2C 静止气象卫星资料反演云特征参量

气象卫星观测资料包含较为丰富的云辐射特性的空间和时间变化信息。作为一种重要的观测手段, 卫星资料在云和降水物理观测研究中以其独特的空对地观测对原有的传统地面观测方式提供了强有力补充(Rosenfeld et al., 2008)。本文利用 FY-2C 静止气象卫星资料反演的云顶高度、云粒子有效半径和云光学厚度 3 个重要特征参数(陈英英等, 2007; 周毓荃等, 2008), 分别从云体宏观与微观特征变化来监测云团结构和探寻人工引晶可能的物理响应。使用的 FY-2C 静止轨道气象卫星资料为等经纬网卫星数据, 资料覆盖范围($0^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$, $70^{\circ} \text{E} \sim 150^{\circ} \text{E}$), 分辨率统一为 0.05° , 间隔 30 分钟。

3 天气背景

2008 年 8 月上旬, 受西风槽、西太平洋副热带高压和高压南部台风的影响, 北京地区较长时间处于副高外围, 暖湿空气不断地向北京地区输送。8 月 8 日副热带高压开始东退减弱。早晨, 郊区的怀柔区和密云县部分地区出现降水; 上午, 河套地区形成的降雨云系不断加强并向北京移近; 午后至傍晚, 副热带高压进一步东退、北抬, 天气系统演变为北京地区西北部受冷空气影响、西南部受 850 hPa 切变线影响, 同时地面倒槽形成并逐渐加深。在切变线和地面倒槽共同作用下北

京西南部不断有系统性对流生成并有向东北方向移动之势,同时西北部不断有冷空气分裂东移、南压,且南北天气系统有打通之势。

奥运会开幕式举行[20时(北京时间,下同)]之前,北京市高空处于副热带高压和西风槽两个系统的过渡带,并且它们的强度与位置均相当稳定(董林等,2008)。20:30,不断涌现的降雨云团从东北、西南两个方向影响北京市郊区,密云县境内观测到雷电发生,城区五棵松一带也开始飘雨。21:35气象监测显示,西南方向河北省保定地区出现了超强对流云团、顶高近20 km并向北京逼近。此外,北京市门头沟、顺义、密云等区(县)也出现了局地较强对流云团。

4 人工消减雨作业情况

根据北京2008年奥运会开、闭幕式人工消(减)雨作业实施方案,北京市西北、正西、西南、正南、东南、东北6个方向分别设立了多道空中与地面作业防线。在西南方向,第一道防线位于河北省保定地区,主要负责对云和降水实施人工增雨提前降水作业;第二道防线则位于北京市房山区境内,主要担负对进入防区内的云和降水实施过量播撒作业。图2为实施人工消减雨作业的主要地面装备及其弹道示意图。作业中使用的RYI-6300专用型增雨防雹火箭弹,每枚携带碘化银催化剂25 g,碘化银复合焰剂的成核率为 1.03×10^{15} (-10°C),发射火箭仰角为 60°

~ 65° 。

图3给出了北京西南部房山区境内地面自动气象站和临时建立的佛子庄、岳各庄西等11个地面流动火箭作业点的位置以及各作业点安全射界。根据云(系)发生发展情况,8月8日从16:08开始,人工影响天气决策指挥人员分别组织了西北、正西和西南3个防线的地面火箭作业点对出现的对流云团实施抑制,每次作业单作业点集中发射专用火箭弹9~18枚,持续时间约10分钟。针对西南方向较强对流云团的地面主要作业信息详见表1(编号11作业点无作业)。可以看到,随着西南方向对流云团的发展加强和移近,地面火箭拦截集中在20:53~22:45。在近2个小时内,仅房山区一道防线就发射了专用火箭弹435枚,接近奥运会开幕式当日整个过程作业总量(1110枚)的半数。

5 地面降水实况及变化

地面自动气象站加密观测显示,8月8日下午开始,延庆、昌平、房山、门头沟、海淀、丰台、石景山、怀柔、密云、大兴等区(县)都监测到有降水(含微量)。傍晚到夜间,降雨云团从东北和西南两个方向逐渐影响北京郊区,部分地区出现了强降雨并伴有雷电发生。图4中8日18时~9日00时累计6小时降水量分布显示,此次降水主要分布在北京西南部的房山区与北部、东北部的怀柔区和密云县一带,城区降雨量不大。最大降

表1 2008年8月8日北京房山区地面火箭作业情况
Table 1 Cloud seeding information in Fangshan district on 8 Aug 2008

作业点 编号	作业点 名称	发射专用火箭弹枚数							
		18:45~18:51	18:59~19:06	20:05~20:12	20:53~21:05	21:15~21:25	21:45~22:03	22:03~22:20	22:32~22:45
1	佛子庄			9			15	15	
2	河北镇			9			15	15	
3	长沟镇			9		15	15	15	15
4	岳各庄西	12	12	9	15		15	6	
5	周口			9		15	15	15	15
6	石楼镇			9			15	12	15
7	琉璃河			9			15	15	15
8	南召村			9			15	15	15
9	窑上			9			15	15	18
10	永定河滩			9			9	15	15

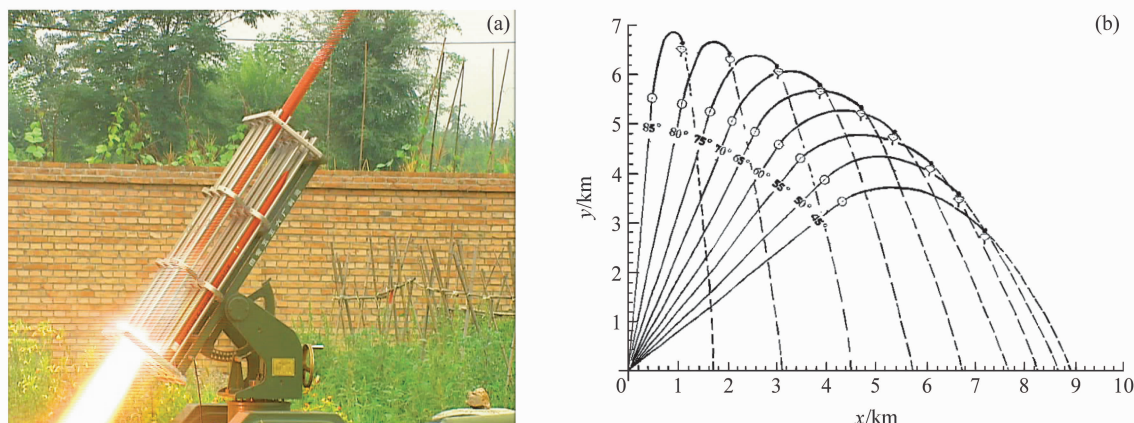


图 2 (a) 地面火箭发射架、专用火箭弹以及 (b) 火箭弹不同仰角弹道示意图

Fig. 2 (a) Ground-based rocket launcher, special rocket, and (b) the trajectory curves for different elevations

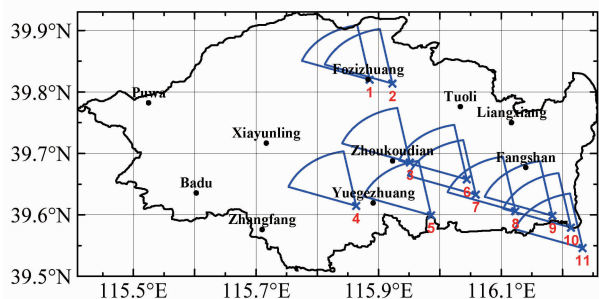


图 3 北京房山区地面自动气象站 (圆点)、火箭作业点 (×号) 及其射界 (扇形) 的分布

Fig. 3 Distribution of the AWS (solid dot), operation sites (X shape) and their effective ranges (fan frame) in Fangshan district

水出现在密云县溪翁庄, 降水量超过 40.0 mm。在西南部房山区, 降水开始时间略早于密云县, 降水量也较多, 监测的最大降水量在张坊自动气象站, 累积降雨量为 15.2 mm。

从图 5 每 30 分钟累积降雨量的变化来看, 在 18 时之前北京市境内仅延庆县和门头沟区极个别自动气象站观测到 0.1 mm 降雨。随后房山区境内的局地对流云团有所增强, 霞云岭单站出现 30 分钟累积降雨 2.6 mm, 持续十几分钟后很快结束。19:00 以后, 位于怀柔南部的对流云团也有所加强, 30 分钟最大降雨达到 8.6 mm。此后, 位于怀柔区南部的对流云团继续加强并向东北方密云县缓慢移动, 而西南方向强对流云团也逐渐移入北京市房山区境内。至 20:00 奥运会开幕式举行, 北京市西南部和北部、东北部均存在明显降雨, 并且离城区最近的五棵松地区也监测到有

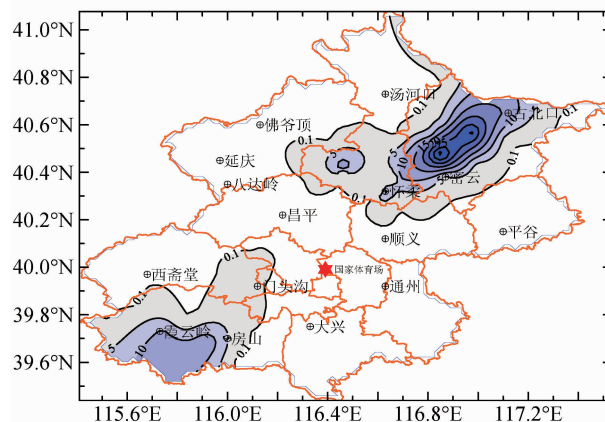


图 4 2008 年 8 月 8 日 18 时~8 月 9 日 00 时地面 6 小时累积降水量分布 (单位: mm)

Fig. 4 Distribution of the 6-hour rainfall (mm) from 1800 LST 8 Aug to 0000 LST 9 Aug 2008

微量降雨出现。特别是西南部对流云团向东北移动并逼近城区, 给国家体育场内奥运会开幕式活动的正常进行带来了极大威胁。

对应表 1 地面作业情况可发现, 20:00 之前对云团实施火箭作业人工影响, 房山区作业点下风方均未有降雨发生。当个别作业点监测到有降雨出现后, 20:05~20:12 房山区多个地面火箭作业点大规模作业, 20:30、21:00 降雨量分布形状出现了明显变化, 雨带北伸, 但作业区域及邻近作业点的下风方雨量相对周围地区减小, 房山区东侧多个地面火箭作业点周围无降雨发生。21:00~21:30 前后, 经作业点 3 (长沟镇)、4 (岳各庄西)、5 (周口) 火箭作业后, 雨量分布的北端回

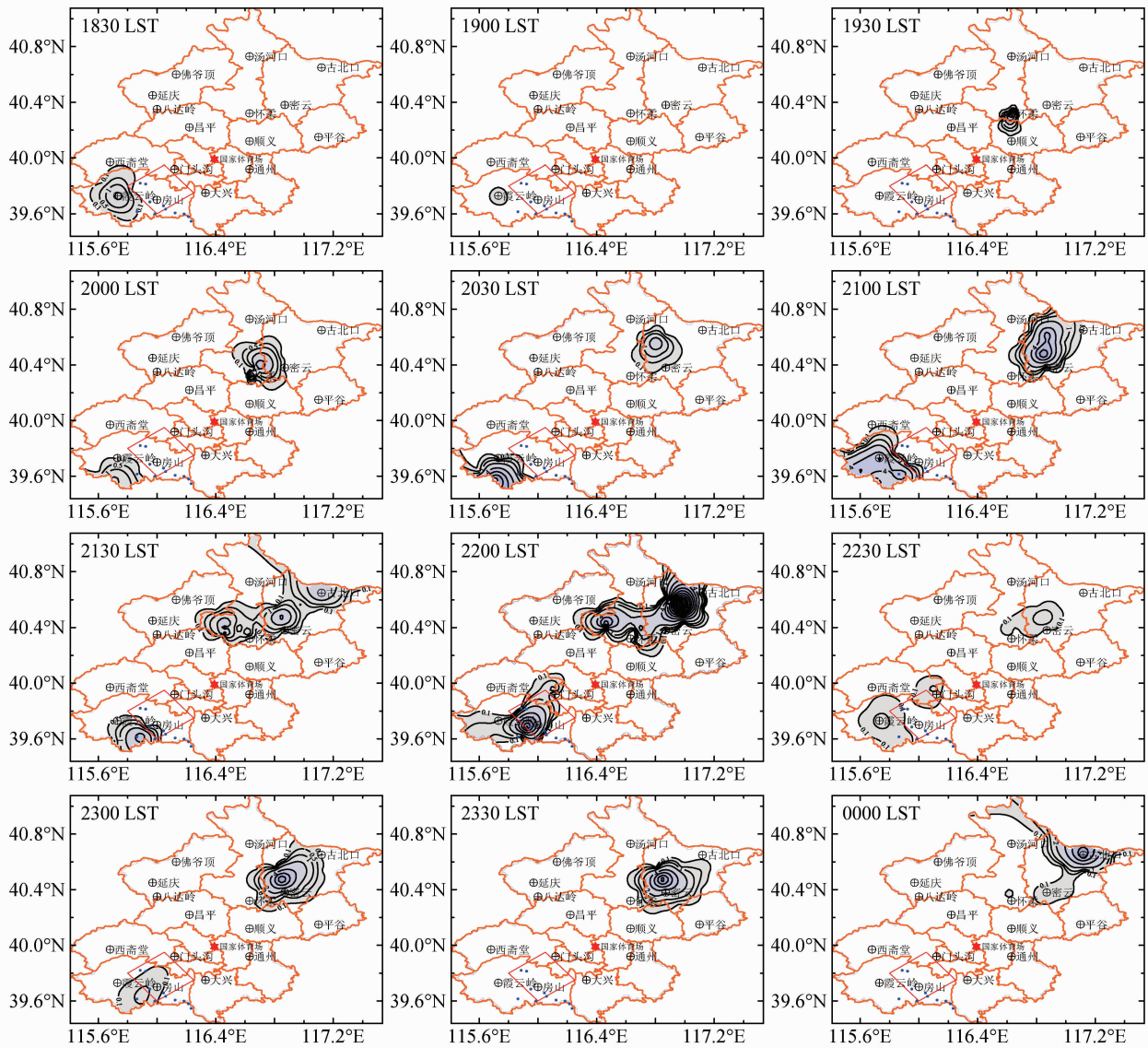


图5 2008年8月8日18时至8月9日00时地面每30分钟累积降水量变化(单位:mm),图中蓝色点为地面火箭作业点位置,红线区域为图9选取的目标区范围

Fig. 5 Accumulated rainfall (mm) every 30 minutes from 1830 LST 8 Aug to 0000 LST 9 Aug 2008. The operation sites in Fangshan district (blue dot) are marked together with the target area (red line) defined in Fig. 9

收,降水强度也减弱。而图5在22:00之前,北部的密云和怀柔交界处一直有明显的降水维持和加强,且其渐向西、向南伸展。

21:30~22:00前后,西南部雨量加大且雨带向北、向东发展推进,与东北部西伸的雨带相呼应,对城区和国家体育场造成极大威胁。当西南部强降水云团移入作业点上空后,地面10个火箭作业点对之实施了大规模作业。由22:30雨量分布可见,两轮高强度火箭作业后雨量中心沿西南—东北方向解体一分为二,分别位于房山区作业

点西侧和门头沟区与石景山区的交界处,中心最大雨量均不及1.0 mm。此后,西南部逼近城区的云团降雨很快结束,而北部雨带在向东北方向移出过程中仍然一直维持着较强的降水。房山区东侧各火箭作业点则继续对东移的云团施加高强度影响,至23:00北京市西南部降雨全部结束。

从图6房山区沿着云和降水移动方向的张坊、岳各庄、周口店、坨里4个地面自动气象站30 min累积降水量变化可以看到,4个测站的降水基本上依次发生,周口店自动气象站自21:30之后

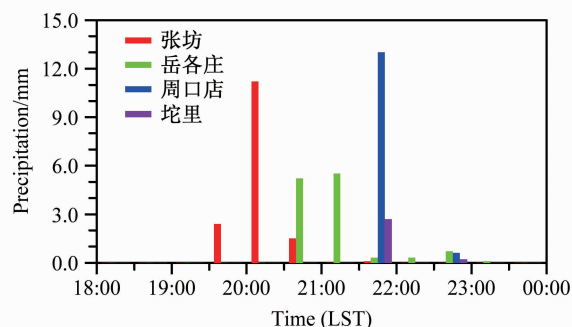


图 6 2008 年 8 月 8 日 18 时~8 月 9 日 00 时房山区地面自动气象站每 30 分钟累积降水量变化

Fig. 6 Time series of the 30-minute rainfall observed at the four AWSs in Fangshan district from 1800 LST 8 Aug to 0000 LST 9 Aug 2008

30 分钟降雨量达 13.0 mm, 对应图 5 中地面雨量分布面积较广且逼近城区, 这表明对流云团在移动过程中存在发展加强现象。

从图 7 作业点 3 (长沟镇)、4 (岳各庄西)、5 (周口) 的作业时间与可能影响到的岳各庄和周口店两个地面自动气象站降水的时段、强度配置来看, 20:30 之前与 21:45 之后针对较强云团实施地面火箭作业后, 两个自动气象站均未监测到降水。岳各庄自动气象站 20:50 监测到 5 分钟累积降水量达到 4.5 mm, 紧邻其西侧的作业点 4 随即实施单点作业加以抑制, 雨量有所减弱, 但作业结束后至 21:10 累积 10 分钟降水又有所增强; 靠近作业点集中位置的周口店自动气象站自 21:05 开始出现降水且强度逐渐加大, 至 21:15 时累积降水量已达 7.9 mm。其周边的作业点 3、作业 4 和作业点 5 迅速组织实施火箭作业, 3 个作业点结

束作业后监测的雨量明显减弱, 并且降水很快停止。由此可见, 多点催化的效果明显好于单点作业的影响。

6 雷达反射率因子变化

8 月 8 日傍晚, 雷达探测显示西部有离散的对流云团向北京市移近, 降雨云团从西南、东北两个方向逐渐影响北京郊区, 16 时云团已逼近北京市境内。图 8 在 18:30 前后, 房山区境内对流单体有所增强, 对应图 5 霞云岭自动气象站单站出现短时降雨。19:00 后西南方向对流云团继续旺盛发展, 并逼近北京房山区。在怀柔区南部也出现较强对流单体, 其与西南部对流云团一道不断地发展、加强。20:48 东北、西南两个方向的降雨云团对城区形成“合围”之势, 密云县还观测到有雷电。21:00 后, 西南部对流云团在向东北方向推进过程中, 后部回波一直发展较强, 而前部强回波的主体明显趋于减弱。此外, 云团前部还有小块回波在发展北伸, 对应于地面降雨逐渐逼近城区。到了 21:30, 西南方向强降雨云团的主体在房山区境内停滞不前, 云团前部回波的强度不断减弱。22:00 之后, 西南部回波主体开始向东南方向转移, 逐渐移出北京市。相较西南部的降水云团, 北京东北部的对流云团在向东和向北缓慢移动过程中则一直维持着较强的回波强度, 并且其移动的方向和速度在 21:30 之前与西南部的对流云团基本保持同步。

根据紧邻房山区东侧大兴区内观象台站的探

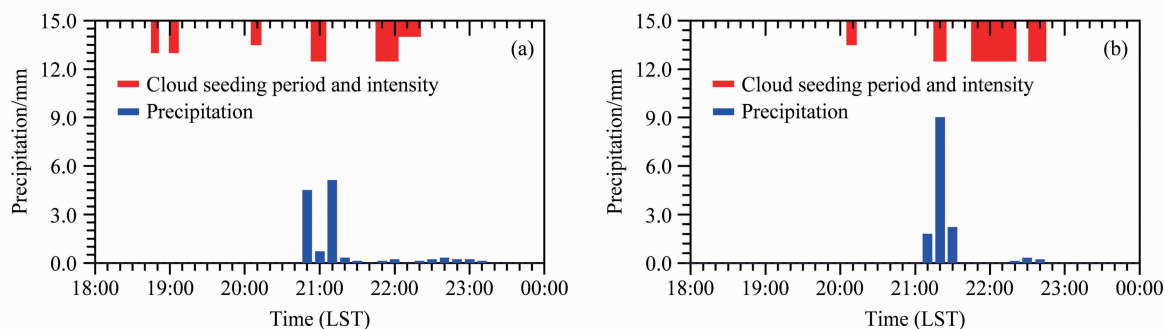


图 7 2008 年 8 月 8 日 18 时~8 月 9 日 00 时房山区 (a) 岳各庄、(b) 周口店地面自动气象站 10 分钟累积降水量变化及临近的地面火箭作业点催化时段和强度 (红色条)

Fig. 7 Time series of the 10-min rainfall at the AWSs of (a) Yuegezhuang and (b) Zhoukoudian from 1800 LST 8 Aug to 0000 LST 9 Aug 2008, together with the seeding time period and intensity (red bar)

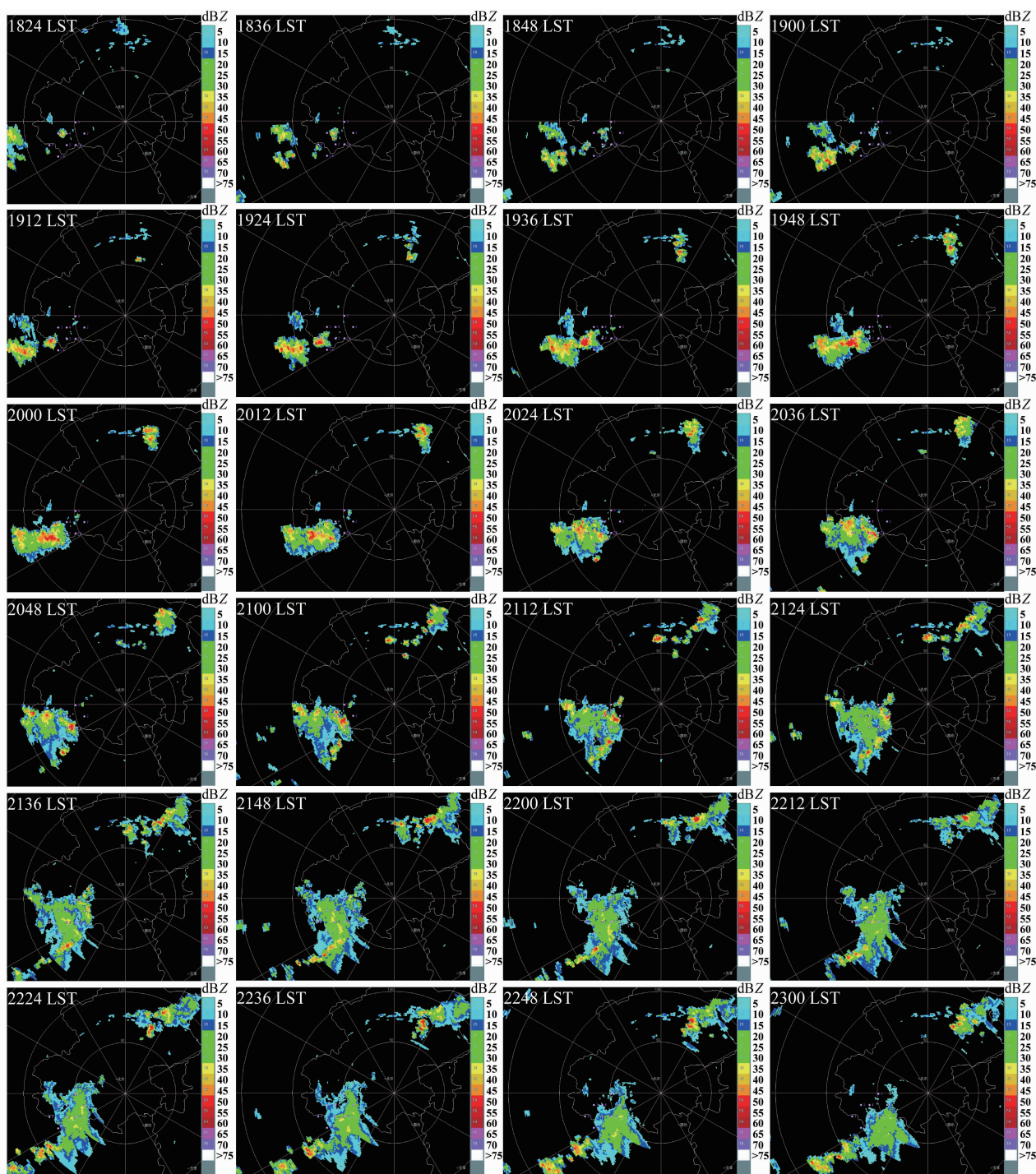


图8 2008年8月8日18:24~23:00雷达回波反射率CAPPI(高度5.0 km)

Fig. 8 Radar reflectivity CAPPI (at 5.0-km level) from 1824 LST to 2300 LST 8 Aug 2008

空、TP/WVP-3000微波辐射计及风廓线监测,8日20时前后 0°C 对应高度大约在5 km附近,其间高空盛行西南风,风向 240° 左右。结合高空风向与地面火箭作业点分布情况,我们在西南部火箭作业点邻近的下风方选取目标区(TA)来对

云、降水和催化物理响应参数进行分析。考虑到东北部的对流云团发展演变情况与西南方向进入房山区后的云团较为相似,我们在东北部选取了同样面积大小的控制区(CA)作为比较(图9)。

从图10给出的8日21:00~22:00雷达回波

反射率局部变化可以看出, 当对流云团进入作业区后, 地面火箭作业点 4 (岳各庄西) 于 21:00 前后实施了单点作业, 回波在东移过程中强度变化不明显。21:15~21:25 作业点 3 (长沟镇) 和作业点 5 (周口) 进行火箭作业后, 云团前部回波强中心的面积明显缩小。而在 21:45~22:03 时间段地面多个点火箭作业点高强度作业影响后, 对流云团前部回波趋于离散, 回波强度迅速降低、

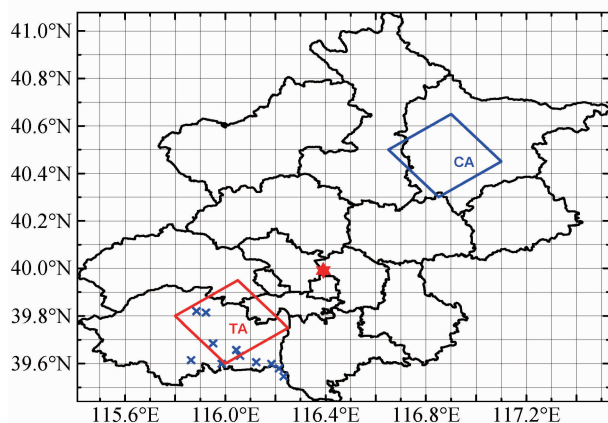


图 9 北京房山区地面火箭作业点分布 (×号) 和选取的目标区 (TA)、控制区 (CA) 范围

Fig. 6 Distribution of the target area TA (red line), control area CA (blue line), and the operation sites (× shape) in Fangshan district

由 50 dBZ 以上降至只有 30 dBZ 左右。从图 11 对应的雷达反射率 RHI 显示变化也容易看出, 受地面火箭作业影响, 回波强中心所在高度降低, 并且回波强度也明显减弱。可见, 地面火箭大规模作业在一定程度上减弱或抑制了云团的发展。

雷达探测显示, 目标区主要降水时段 8 日 20:30~23:00 回波组合反射率因子均低于 60 dBZ。从图 12 雷达回波组合反射率因子 Z 的 4 个主要强度级别 (即: $Z < 15$ dBZ; 15 dBZ $\leq Z < 30$ dBZ; 30 dBZ $\leq Z < 45$ dBZ; 45 dBZ $\leq Z < 60$ dBZ) 面积百分比随时间的变化容易看出, 在 21:24 之前, 目标区内降水回波总体处于发展和加强阶段, 主要表现为易形成降水的 30~45 dBZ 和 45~60 dBZ 两个回波组合反射率强度级别所占面积逐渐增加, 最大分别占到整个云体的 15%、35%。21:24 之后, 对流云团内 4 个主要强度级别出现了明显的变化, 45~60 dBZ 回波组合反射率强度级别面积百分比开始递减, 30~45 dBZ 回波组合反射率强度级别增加并持续约 10 分钟后也迅速减少, 云体强度趋于减弱。与之相反, 强度小于 30 dBZ 的不利于形成降水的回波所占比例则显著攀升, 尤其是 15~30 dBZ 回波组合反射率强度级别所占比率大幅增加, 最多时近占到云体的 70%。与地面火箭作业时间相配置容易发现,

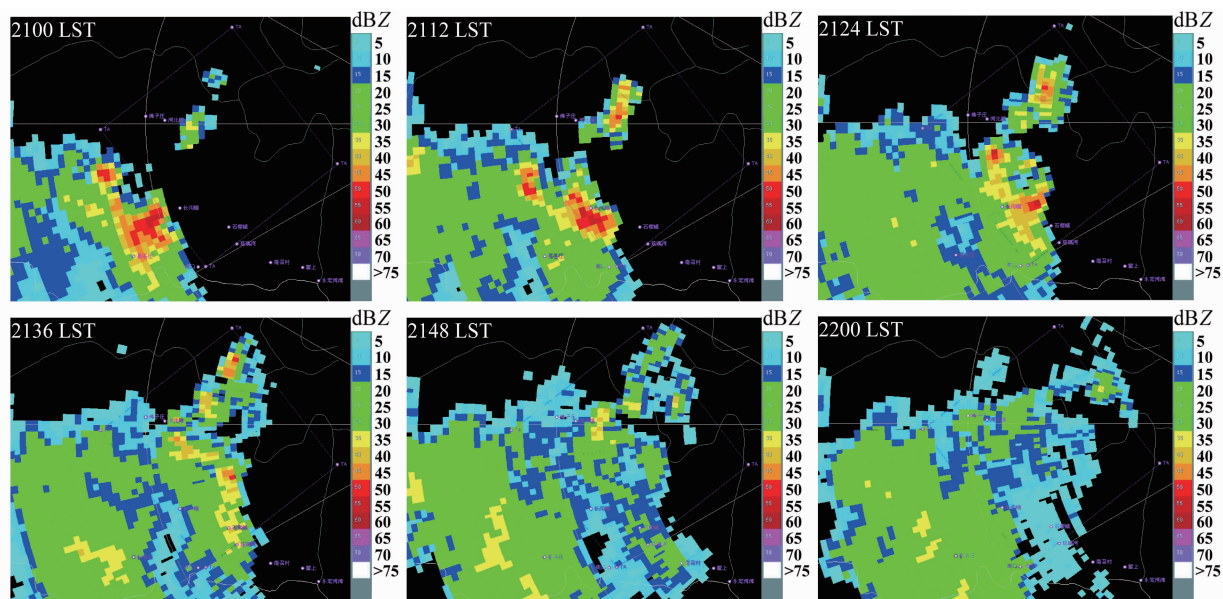


图 10 2008 年 8 月 8 日 21:00~22:00 雷达回波反射率 CAPPI (高度 5.0 km)

Fig. 10 Radar reflectivity CAPPI (at 5.0-km level) from 2100 LST to 2200 LST 8 Aug 2008

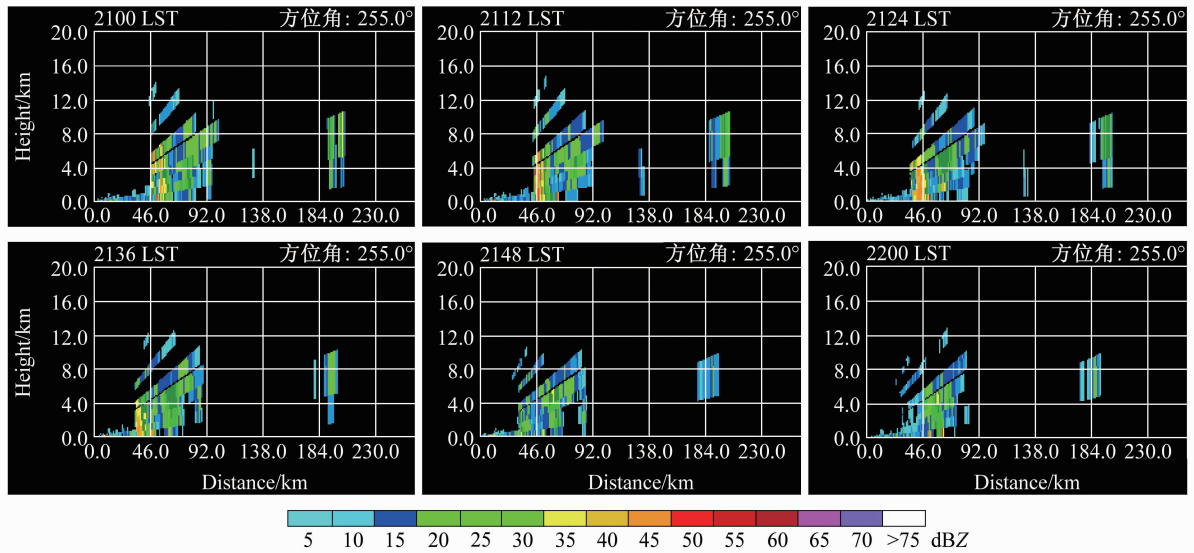


图 11 2008 年 8 月 8 日 21:00~22:00 雷达回波反射率 RHI (方位角 255.0°)

Fig. 11 Radar reflectivity RHI (at 255° azimuth) from 2100 LST to 2200 LST 8 Aug 2008

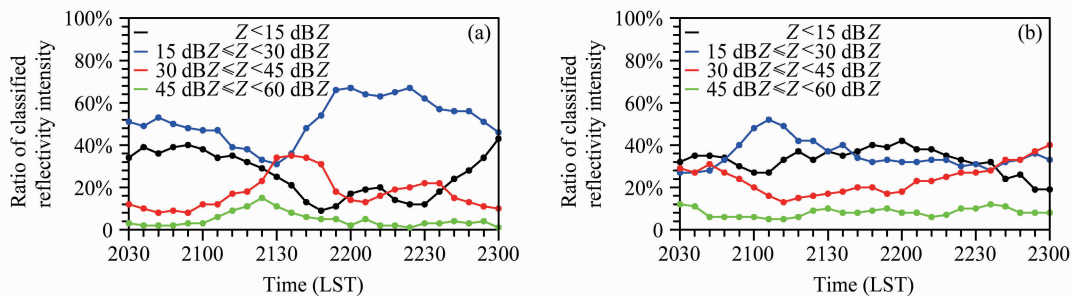


图 12 2008 年 8 月 8 日 20:30~23:00 (a) 目标区和 (b) 控制区内雷达反射率分级强度统计随时间变化

Fig. 12 Ratios of classified radar reflectivity intensity in the (a) target area and (b) control area defined in Fig. 9 from 2030 LST to 2300 LST 8 Aug 2008

目标区内回波组合反射率强度的这种变化与 21:15~21:25 以及之后的连续多次高强度火箭作业影响存在明显关联。

北京东北部控制区内的雷达回波组合反射率分级强度统计变化显示, 4 个强度分级所占面积百分比随时间的变化相对较小。21:12 之前, 15~30 dBZ 回波组合反射率强度级别所占云团面积比例相对较多, 但之后云团一直缓慢发展和加强, 并一直持续到 8 日 23:00 以后。

7 云特征参量变化

FY-2C 卫星资料反演的云顶高度 (ZTOP) 分布显示, 8 月 8 日夜间 18 时以后北京市周边地

区存在较强的对流云团。北京东部和东北部密云县、平谷区和顺义区一带云体不断发展加强, 云顶高度接近 10 km, 云团移动缓慢且有西伸并向城区推进趋势。西南方向河北省保定地区境内对流云团发展较为旺盛, 云顶高度也在 10 km 以上, 并且云团整体在不断东进北升, 云团前部向北京房山区逐渐逼近, 与雷达探测相对应 (图 13)。

图 14 卫星资料反演的 8 日 21:00~22:00 北京西南部房山区境内一直存在顶高较高的云团。21:00~21:30 云团所处位置变化不大, 该时段内房山区内一直存在云粒子有效半径 REF 约 30 μm 左右的大面积分布区域, 云团发展较强同时也利于降水的生成 (Rosenfeld and Gutman, 1994)。到了 21:30 之后云团在向东推进过程中

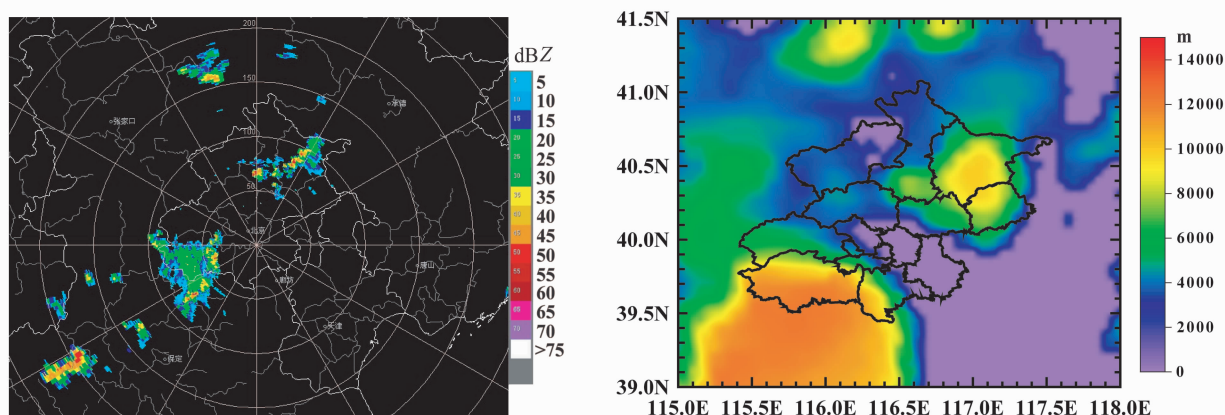


图 13 2008 年 8 月 8 日 21:30 (a) 雷达回波反射率 CAPPI (高度 5.0 km) 和 (b) FY-2C 卫星资料反演的云顶高度 ZTOP 分布
Fig. 13 (a) Radar reflectivity CAPPI (at 5.0-km level) and (b) cloud top height (ZTOP) retrieved from the FY-2C satellite data at 2130 LST 8 Aug 2008

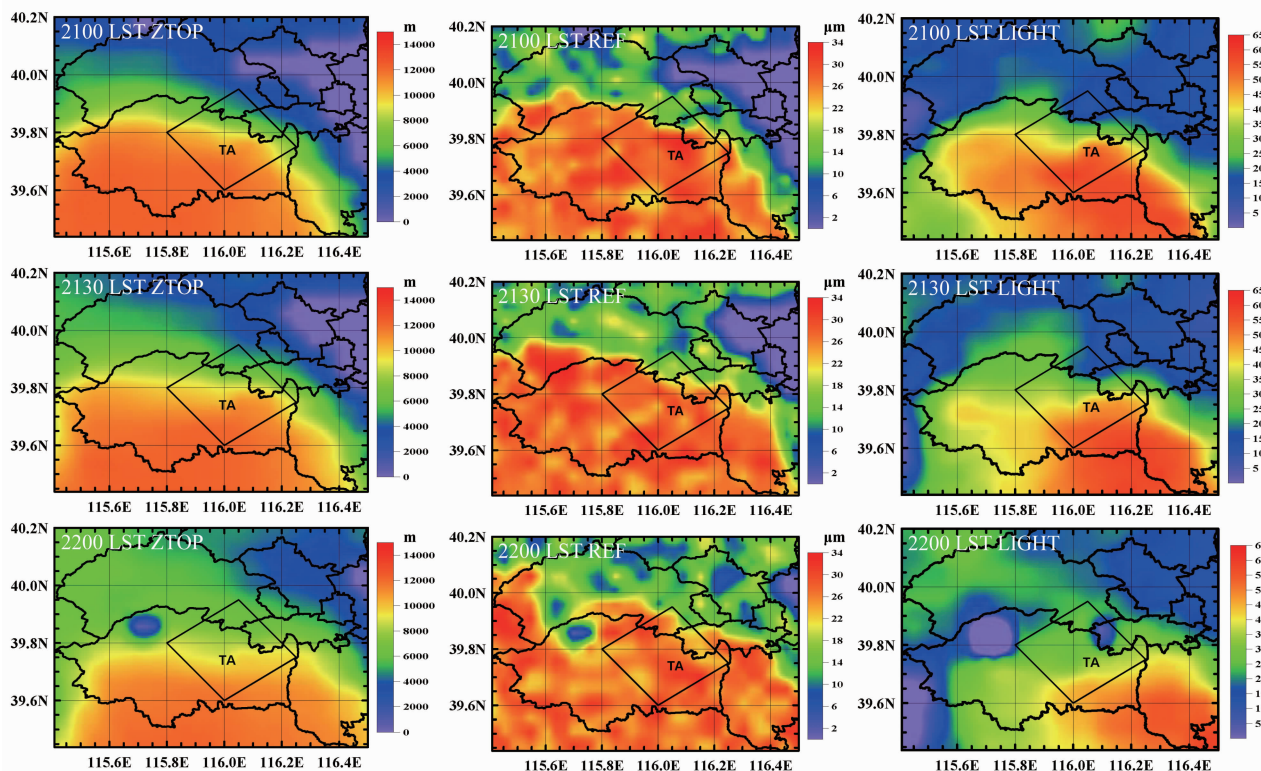


图 14 2008 年 8 月 8 日 21:00~22:00 时段 FY-2C 卫星资料反演的北京西南部云顶高度 ZTOP (左列)、云粒子有效半径 REF (中列) 和云光学厚度 LIGHT (右列) 随时间变化
Fig. 14 Cloud top height (ZTOP) (left column), cloud effective particle radius (REF) (middle column), and cloud optical thickness (LIGHT) (right column) retrieved from the FY-2C satellite data in the southwest of Beijing from 2100 LST to 2200 LST 8 Aug 2008

主体有所南撤, 目标区内云顶高度明显降低, 6~8 km 高的云层进一步向城区移近。较大云粒子覆盖的区域总体趋于减少。结合云光学厚度变化容易发现, 目标区内虽然在 21:30 之后仍然存在较大云粒子分布区域, 但其云光学厚度大为下降,

并在云团前端还观测到了一个特别低的云光学厚度分布区。这表明了云层的密实程度大为减弱。云特征参量的这种变化与 21:15 之后地面火箭高强度作业以及雷达回波参量出现的明显变化基本一致。

8 结语

结合地面火箭作业情况,对北京 2008 年奥运会开幕式活动期间云和降水主要特征以及北京市西南部房山区内人工消减雨作业的物理效果进行了分析,结果表明:

(1) 受副热带高压和西风槽系统共同影响,2008 年 8 月 8 日北京地区出现了明显降水。8 日 19 时~23 时地面降水集中分布于西南部房山区与北部—东北部怀柔区和密云县一带。北京西南和东北方向云体发展较为旺盛,西南部对流云团和雨区向东偏北移动过程中威胁到城区和国家体育场,北部—东北部对流云团和雨带在向东北方向缓慢移出过程中也出现西伸、南压现象。

(2) 结合地面火箭作业的时间、空间分布,针对西南方向较强云团施加人工影响后,目标区降雨量分布形状出现了明显改变,雨量相对周围地区减小。高强度火箭作业还促使雨量中心分离。受地面火箭大规模作业的影响,监测的作业区自动气象站雨量明显减弱,地面多点催化效果好于单点作业的影响。

(3) 雷达探测显示,西南方向对流云团进入房山区后其主体移动缓慢,最后其向东南方向缓慢转移并移出北京市。雷达回波强度 CAPPI 和 RHI 显示,地面火箭作业促使了回波强度减弱,强中心高度降低。对应 21:15~21:25 以及之后的连续多次高强度火箭作业影响,作业后目标区内 30~60 dBZ 回波组合反射率分级强度所占面积减少,而小于 30 dBZ 的回波组合反射率所占比例显著攀升。

(4) 卫星资料反演的云特征参量显示,8 月 8 日夜 18 时以后北京东北和西南方向均出现了云顶较高的对流云团。21:30 之前,云团发展较强,并利于降水的生成。21:30 之后,目标区虽仍然存在较大云粒子分布区域,但其云光学厚度明显下降,云层密实程度大为减弱。云特征参量的变化与地面火箭高强度作业以及雷达回波参量的明显变化基本一致。

参考文献 (References)

别拉耶夫 B II, 等. 1998. “95·5·9” 莫斯科多架飞机人工消云

- 和减弱降水试验 (中译) [J]. 新疆气象, 21 (3): 44, 47.
- Petrov Victor B II, et al. 1998. ‘95·5·9’ cloud dispersal and rain mitigation experiments with multi-aircrafts in Moscow city (translated into Chinese) [J]. Xinjiang Meteorology (in Chinese), 21 (3): 44, 47.
- 陈英英, 周毓荃, 毛节泰, 等. 2007. 利用 FY-2C 静止卫星资料反演云粒子有效半径的试验研究 [J]. 气象, 33 (4): 29-34.
- Chen Yingying, Zhou Yuquan, Mao Jietai, et al. 2007. Experimental research of the retrieval of cloud effective particle radius by FY-2C geostationary satellite data [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33 (4): 29-34.
- 董林, 张明英, 郭虎, 等. 2008. 北京奥运会开幕式天气预报难点的初步分析 [J]. 气象, 34 (专刊): 9-15.
- Dong Lin, Zhang Mingying, Guo Hu, et al. 2008. Preliminary analysis on weather forecasting difficulties during the opening ceremony of 2008 Beijing Olympic Games [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (suppl.): 9-15.
- 黄美元, 沈志来, 洪延超. 2003. 半个世纪的云雾、降水和人工影响天气研究进展 [J]. 大气科学, 27 (4): 536-551.
- Huang Meiyuan, Shen Zhilai, Hong Yanchao. 2003. Advance of research on cloud and precipitation and weather modification in the latest half century [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 536-551.
- Korneev V P, Petrov V V, Diadyuchenko V N, et al. 2003. Results of cloud seeding operations to modify weather conditions over cities [C]. Eighth WMO Scientific Conference on Weather Modification, WMO/TD No. 1146: 227-230.
- 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 967-974.
- Lei Hengchi, Hong Yanchao, Zhao Zhen, et al. 2008. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 967-974.
- 李大山, 章澄昌, 许焕斌, 等. 2002. 人工影响天气现状与展望 [M]. 北京: 气象出版社, 551-555.
- Li Dashan, Zhang Chengchang, Xu Huanbin, et al. 2002. The status and development prospects of weather modification [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 551-555.
- Rosenfeld D, Gutman G. 1994. Retrieving microphysical properties near the tops of potential rain clouds by multispectral analysis of AVHRR data [J]. J. Atmos. Res., 34: 259-283.
- Rosenfeld D, Woodley W L, Lerner A, et al. 2008. Satellite detection of severe convective storms by their retrieved vertical profiles of cloud particle effective radius and thermodynamic phase [J]. J. Geophys. Res., 113, D04208, doi: 10.1029/2007JD008600.
- Schaefer V J. 1946. The production of ice crystals in a cloud of supercooled water droplets [J]. Science, 104: 457-459.
- 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 Jiadong. 1993. On the possibility of artificial suppression of heavy rains [J]. Journal of Nanjing Institute

- of Meteorology (in Chinese), 16 (3): 373–378.
- 张纪淮, 苏正军, 关立友, 等. 2005. 人工影响天气几个前沿科技问题的研究与思考 (II) [C] //第十四届全国云降水物理与人工影响天气科学会议论文集. 北京: 气象出版社, 753–754.
- Zhang Jihuai, Su Zhengjun, Guan Liyou, et al. 2005. Study and ideas of some front scientific issues on weather modification (Part II) [C]. 14th Chinese Scientific Conference on Cloud and Precipitation Physics and Weather Modification (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 753–754.
- 周毓荃, 陈英英, 李娟, 等. 2008. 用 FY-2C/D 卫星等综合观测资料反演云物理特性产品及检验 [J]. 气象, 34 (12): 29–39.
- Zhou Yuquan, Chen Yingying, Li Juan, et al. 2008. Retrieval and preliminary test of cloud physical parameters from combination of FY-2C/D geostationary satellite data and other observation data [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (12): 29–39.
- 朱燕君, 陈峪, 李庆祥, 等. 2006. 北京奥运会期间的气象条件分析 [J]. 应用气象学报, 17 (增刊): 35–41.
- Zhu Yanjun, Chen Yu, Li Qingxiang, et al. 2006. Preliminary analysis on meteorological conditions during 2008 Beijing Olympic Games [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (Suppl.): 35–41.