

北京 2008 年奥运会开幕式人工消减雨作业

张 蔷 何 晖 刘建忠 李宏宇 黄梦宇 马新成

(北京市人工影响天气办公室, 北京 100089)

提 要: 自 2002 年 6 月起北京市人工影响天气办公室依托北京市科委重点课题“奥运期间人工防雹、消雨作业试验研究”进行了人工消(减)雨的研究,在此研究基础上提出了北京 2008 年奥运会开闭幕式人工消减雨作业技术方案和实施流程,针对北京 8、9 月份天气的特点和云系影响北京的来向,设计奥运会开闭幕式消减雨 18 个作业区,并分析了前期试验结果。重点分析了 8 月 8 日天气特点,及相应的飞机、地面火箭作业情况,并对作业效果进行分析。地面火箭大规模消云减雨作业后,雷达回波强度明显减弱,雷达回波趋于消散,尤其是在 21:48—22:00 作业阶段,雷达回波出现一个明显的缺口。对雷达回波按强度分档,从各档强度的雷达回波面积变化可以看出,回波变化的明显的特征是强回波面积逐渐减少,而弱回波面积则在逐渐增加。卫星资料反演的云顶高度和云粒子有效半径也能比较清楚地显示出大规模作业后的效果。

关键词: 人工消减雨 作业技术方案 消雨效果

Brief Introduction of Rain Mitigation Operation During Beijing 2008 Olympic Opening Ceremony

Zhang Qiang He Hui Liu Jianzhong Li Hongyu Huang Mengyu Ma Xincheng

(Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089)

Abstract: Supported by the Beijing Municipal Science and Technology Commission key project “Research on the hail suppression, rain mitigation operation during Olympic period”, the technology of the rain mitigation operation during Beijing 2008 Olympic opening and closing ceremony was studied since 2002. The rain mitigation technological scheme, the rain-mitigation working flow was made on the basis of the study. 18 rain mitigation operation areas were designed according to the weather characteristics and cloud moving direction during August and September in Beijing Area, and the preliminary experiment results were also

资助项目: 中国气象局气象新技术推广项目“国庆六十周年人工消减雨技术研究”; 国家“十一五”科技攻关项目“北京地区人工消雾技术研究”(2006BAC12B04)

收稿日期: 2008 年 12 月 1 日; 修定稿日期: 2009 年 6 月 3 日

analyzed. Weather characteristics, seeding operation and the evaluation of the operation effect on 8th August were mainly analyzed in the paper. It shows that the intensity of radar echo is weakened, the height of the radar echo is lowered and the area of intense radar echo is decreased dramatically after the rain mitigation operation. Especially after the seeding operation between 21:45–22:00, there was a gap obviously appeared in the radar echo. In addition, according to the change in the grade of the radar echo intensity we can see that the area of the strong echo was diminished gradually, while the area of the weak echo was increased. The cloud top height and the cloud effective particle radius over the seeding place retrieved by the satellite also revealed the effect of the seeding operation.

Key Words: rain mitigation technical scheme evaluation of the seeding operation effect

引 言

从 20 世纪 40 年代末以来,现代人工影响天气在全世界大范围得以快速发展。其中在人工影响天气开展最多的是人工增水作业。北京地区区域可供水量已难以满足工农业生产与城市生活用水需要,北京市政府在积极开源节流,引水济京;同时进行了高炮、火箭和飞机人工增雨作业,以缓解北京地区水资源紧缺^[1-4]。人工影响天气理论也随着人们对云和物理降水过程认识的提高不断完善。近年来,随着城市经济的不断发展,需要举行大量大型露天活动,人工消减雨作业日益受到社会的重视。

2008 年北京奥运会期间正值主汛期,北京地区此期间降水量可占全年总降水量的 40%~50%。为了提升对 2008 年北京奥运会的气象保障技术能力,需要气象部门通过人工消云减雨来保障开闭幕式的顺利举行,作为人工影响天气技术重要内容的人工消雨技术,它是人工增雨和人工防雹技术的扩展与延伸,目前还处于研究起步阶段,是值得我们认真探索研究的新领域^[5]。经过几年的试验、论证,最终形成了《北京 2008 年奥运会开闭幕式人工消减雨技术方案》。在 2008 年 8 月 8 日以及 24 日的奥运会开闭幕式日,依据当时的天气形势,北京人工影响天气办公室

按照消减雨方案积极组织了消减雨作业,取得了很好的消雨效果。

本文在回顾总结奥运会筹办以来 7 年的论证和科学试验的基础上,重点对 8 月 8 日奥运会开幕式日的天气形势、作业过程及作业效果进行分析介绍。

1 人工消(减)雨科学原理

叶家东等^[6]从人工增雨的反效果提出,不论是静力催化还是动力催化都附有一系列“可播性”条件,其中任意一条不满足都可能造成增雨无效或减雨的反效果,美国白顶计划^[7]表明人工过量播撒 AgI 可导致降水减少,以色列人工增雨试验统计分析发现以色列南部接近沙漠,从撒哈拉—阿拉伯沙漠吹来的沙尘提供丰富的冰核,能与播云剂“竞争”,从而对播云效果起到一种抑制或削弱作用^[7],Dennis 和 Koscielski^[8]指出“动力污染”能抑制新对流的发展。此外,李曾中、张纪淮等^[9-10]提出通过人工增雨来调节降水分布,一方面让降水尽可能多的落在旱区,另一方面抑制局地暴雨。1986 年原苏联在切尔诺贝利核电站发生严重泄露的严峻形势下进行了人工消雨试验,效果较好^[11]。

众所周知,大气状态的不稳定性是人工影响天气原理的基础,其中,过冷却液态水的存在和大气垂直不稳定性具有最重要的意

义。在第一种情况下,可通过人工引入结冰剂的方法改变降水形成机制;在第二种情况下,将维持对流发展的大气不稳定能量,通过人工产生下沉气流的方式释放,从而导致对流云的崩溃^[12]。

研究表明^[13],人工核的引入播云可以导致如下一个或更多过程发生:(1)云中降水过程加快,且更多的云水转化为降水;(2)释放的潜热所引起的空气浮力对云发展产生明显的动力学影响;(3)云冰化,将会有效地终止或延迟降水过程。在某些有利地形条件下对云作大剂量播撒所谓过量播撒可以导致降雪带移动达 50km。美国 1969 年 8 月 18 日与 20 日对“黛比”飓风进行干预取得比较好的效果^[14]。

总之,人工消雨的指导思想是设法改变自然云的降水状态或过程,从而降低降水效率;或使云提前降水,或延缓降水过程使降水空间再分布。进行人工消减雨的主要技术思路包括提前降雨和抑制降雨两种方法。

提前降雨是在即将影响某地降雨云系的来向,进行大规模连续催化作业,使云中小水滴长成大水滴,然后提前降落,从而改变降雨分布,使无雨或小雨空隙出现在保护区上空。

抑制降雨方法有:

(1) 过量播撒:密集播撒产生高浓度冰晶,“分食”水汽,使较大水滴变成小水滴或水汽,从而延缓和减弱降水。这就需要选用的催化剂具有高效的成冰能力。在利用过量播撒使云冰晶化达到消云消雨中,综合考虑碘化银作为首选催化剂,但在高温段播撒时可以考虑结合使用液氮和干冰。

(2) 动力下沉:播撒高浓度粒子群,引发下沉气流,抑制云发展和降水。原苏联中央高空观象台在研究影响催化剂其他物理化学特征(比重,分散度)的实验中,曾确定了使用比重大的催化剂可提高影响效率。在利用动力沉降达到消云消雨中,一次性的播撒量要

求较大,过小不易造成人工的下沉气流。

应该指出,人工消(减)雨作业技术目前尚属气象科学前沿,在世界范围内基本处于科学试验的范畴,能进行人工消减雨的条件还应是合适的时机、云和环境条件。

2 前期研究

依托北京市科委重点课题“奥运期间人工防雹、消雨作业试验研究”,对北京地区 8、9 月降水情况进行研究并从 2005 年到 2006 年先后多次进行了利用飞机外场消云和利用火箭减弱积雨云降水的试验。

2.1 北京地区 8、9 月降水特点

对北京地区近 20 年来 8、9 月降水情况进行统计分析,得出了 8、9 月北京地区云和降水宏观分布特征。表 1 为北京 2008 年奥运会、残奥会开闭幕式日的降水概率分布,可以看出在 8 月 8 日北京出现降水的概率为 47.2%。

表 1 北京地区在奥运会残奥会开闭幕式日出现降水概率(%)

奥运会		残奥会	
开幕式	闭幕式	开幕式	闭幕式
8 月 8 日	8 月 24 日	9 月 6 日	9 月 17 日
47.2(%)	25.0(%)	25.0(%)	27.8(%)

将日降水量 $<10\text{mm}$ 定为弱降水,10mm(含)以上降水定为强降水,在 8 月份引起弱降水与强降水的天气型及各自所占的比例见表 2。考虑到 9 月和 8 月比较相似,在此不赘述。

从表 2 可以看出,在弱降水形势中,浅薄西来槽+低空切变线所占比例最大,接近 65%;而西来槽+副高外侧是引起强降水的主要天气形势,所占比例接近 33%。

通过近几年北京 8 月雷达、卫星资料的统计分析,得出了 8 月影响北京的降雨云系

的来向(图 1),从图 1 可以看出西北路、西路与西南路的最多,占总次数的近 70%。

表 2 北京地区 8 月不同的天气型及所占比例

天气形势		所占比例
弱降水 天气型	平直西风+热低压	6.67%
	浅薄西来槽+低空切变线	64.76%
	弱冷空气+锋面	10.48%
	东北低涡后部	9.52%
	弱回流	8.57%
强降水 天气型	东北低涡	16.13%
	西来槽+副高外侧	32.26%
	华北低涡、低槽与切变线	22.58%
	西来槽与地面倒槽	22.58%
	台风倒槽	6.45%

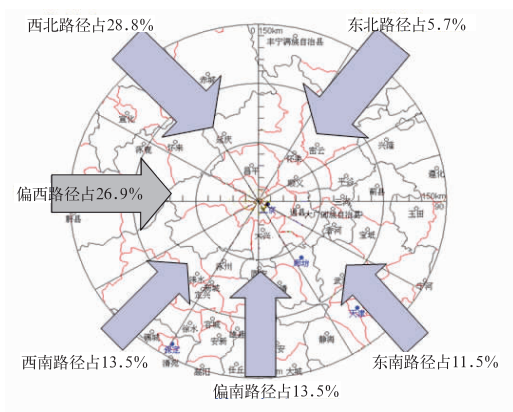


图 1 多年 8 月北京地区降雨云系的来向统计

2.2 奥运会残奥会开、闭幕式人工消(减)雨作业区域设计

(1) 根据北京 8—9 月降水天气的特点和来向,设计出 8、9 月北京地区人工消减雨具体作业区域设置(见图 2)。三条作业区域具体功能为:在第一道作业区域对云系实施增雨作业;针对第一道作业区域催化后未完全消除的或局地生成的稳定性云系,在第二道作业区域实施过量播撒作业,抑制云和降水的发展;若经过前两道作业区域作业后云系仍未完全消除,继续威胁奥运场馆,将在第三道作业区继续过量播撒作业,减弱或消除降水。当出现局地新生的回波系统时,将依

据新生回波的具体位置及新生回波的移动方向,直接在第二和第三道作业区采取过量播撒作业方式进行保护作业。

考虑到地面作业要受到下垫面的影响,飞机和地面火箭作业区的形状稍有差异。

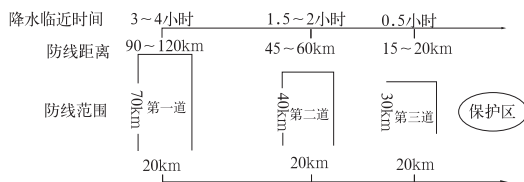


图 2 消减雨三道作业区域设计示意图

(2) 围绕奥运会、残奥会气象保障,在北京周边包括北京上游的山西等地共有不同型号的雷达 10 部,自动气象站和非自动气象站达千个以上,微波辐射计、GPS 水汽、风廓线仪等多部,北京周边探空站在奥运会、残奥会期间加密进行探测,有效地监视天气系统的变化,为人工消减雨提供了丰富的探测资料。图 3(见彩页)为北京区域主要气象探测系统的布局图。

(3) 依托奥运短时临近预报业务系统,高分辨率中尺度探测数据预处理系统(Hi-MAPS)、临近天气预报业务系统(BJ-ANC)、快速更新循环同化预报系统(BJ-RUC)、中尺度集合预报业务系统(MEPOS)、短时临近预报预警人机交互平台(VIPS),“四个系统和一个平台”为实时监测、监视、预测对流云系演变变化,及时评价、评估作业效果提供了有效的工具,提高了影响作业的时效性和科学性。

2.3 消云减雨试验、演练

北京人工影响天气办公室从 2005 年开始直到 2008 年 8 月 8 日奥运会开幕式前的 7 月 31 日利用飞机、火箭等方式组织进行了多次消减雨演练,具体演练情况见表 3。

表 3 北京人影办在 2005 到 2008 年 7 月 31 日进行的主要消减雨演练情况

	时间	作业对象	作业用量	作业区域	作业评估
火箭	2005 年 6 月 7 日	积雨云	16 枚	02 区	效果明显
	2006 年 7 月 12 日	飚线	99 枚	02 区	效果明显
	2006 年 8 月 8 日	积雨云	144 枚	04、05 区	效果明显
	2007 年 8 月 8 日	对流单体	10 枚	02 区	有一定效果
	2008 年 6 月 28 日	雷阵雨	186 枚	02、03、06 区	有一定效果
	2008 年 7 月 4 日	层积云	176 枚	02、03、05、06 区	多道防线作业,效果明显
	2008 年 7 月 8 日	层状云	13 枚	10、11、13、14 区	有一定的效果
	2008 年 7 月 14 日	层积云	336 枚	06、07 区	效果明显
	2008 年 7 月 31 日	层积云	307 枚	01、02、05、06 区	效果明显
飞机	2005 年 6 月 2 日	淡积云	260kg 硅藻土	02 区	效果明显
	2005 年 6 月 16 日	高积云	10 根碘化银烟条	02 区	效果明显
	2005 年 9 月 12 日	层状云	1200kg 硅藻土	17 区	效果明显
	2007 年 8 月 8 日			内蒙古呼和浩特机场	实现了三机配合飞行
	2007 年 8 月 13 日到 19 日	未进行消云作业		北京良乡机场	确定了催化剂配比、包装箱式样、空投方式等技术方面的内容
	2007 年 9 月 29 日	层状云	1750kg 膨润土、32 根碘化银烟条	无锡硕放机场	实现了四机联合飞行
	2008 年 7 月 31 日	层状云	400 枚焰弹、4.5t 硅藻土	13、14 区	效果较明显

2.3.1 地面火箭消云减雨试验、演练

2006 年 7 月 12 日,受蒙古低涡后部东移南下的冷空气和偏南暖湿气流的共同影响,北京自西向东出现了一次飚线过程。雷达探测显示,17 时 49 分强回波前沿逼入延庆县境内,自 17:55—18:14 针对降雨云系发射了 70 余枚火箭弹。

图 4(见彩页)的(a)、(b)为作业前,(c)、(d)、(e)、(f)为作业开始以后的雷达回波图,可以看见,两侧的强中心基本按照原有的强度和速度继续向东移动,而中间的强中心明显减弱,并且移动缓慢。

2.3.2 飞机消云减雨试验

(1) 2005 年 6 月飞机消云试验

2005 年 6 月 2 日北京人影办在北京西北部山区进行了“运五”飞机消云试验,当时进行作业的对象是一块淡积云,首先通过探测飞机“夏延—ⅢA”探测到该淡积云云底为 2600m,云顶大约在 2800m,云层较薄,宽度较窄。探测完毕后,作业飞机“运五”升空在

云顶对云进行催化作业。选用的催化剂是硅藻土吸湿剂,该吸湿剂的粒径为 $20\sim 30\mu\text{m}$ 左右,通过飞机上播撒装置向外集中播撒,播撒剂量为 260kg。

图 5 为当时作业云系从作业之前到作业结束之后的效果变化图。可以看出在作业之前,云系维持稳定,8:58 飞机到达淡积云顶附近并开始催化作业。播撒之后,淡积云顶不断下降,约 2 分半钟后,整个淡积云云体基本崩溃。

(2) 2005 年 9 月飞机消云试验

2005 年 9 月 12 日北京人影办在北京东北部山区进行消云减雨试验^[15]。12 日上午 10:00“夏延”飞机起飞对作业区内云系进行播撒作业前云微物理探测。10:25—11:00 探测飞机到达作业区后从云顶开始从上往下每间隔 300m 对云体进行垂直探测。探测结束后“夏延”飞机爬升到云顶进行作业效果宏观监测。11:00 播撒作业飞机“An26”抵达作业区通过机载播撒装置进行吸湿性催化剂硅藻

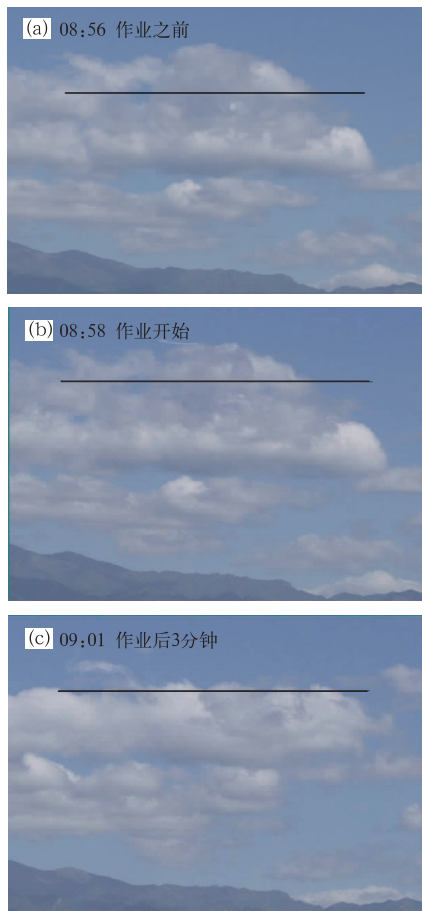


图5 “运五”飞机作业后效果变化图

土的消云播撒作业,飞机共携带 1200kg 催化剂。11:01—11:04 作业飞机在 4200m 高度播撒 200kg 催化剂,而后 11:05—11:25 在 3900m 高度播撒 1000kg 吸湿性催化剂。作业飞行以地面观测点($40^{\circ}12'N, 117^{\circ}15'E$)为中心南北方向飞行,作业距离南北长 20km。“An26”作业结束后,“夏延”飞机于 11:25—11:30 在消云作业下风区域至上而下进行消云效果检验的微物理探测。

图 6 给出作业前、后从 4200m 至 2700m 间隔 300m 高度云滴谱分布的变化情况。比较作业前后可发现在播撒作业高度 4200、3900m 以下能看到云滴谱作业前后有明显变化,大云滴消失小云滴变少。从 4200m 和 3900m 两个高度的云滴谱变化可知作业后

直径大于 $15\mu m$ 的大云滴粒子变少甚至消失,如 4200m 高度上大于 $15\mu m$ 的云滴数浓度密度减少了两个数量级;而在 3900m 高度上前后云滴谱的差异更为明显。最显著的变化在 3600m 高度,在此高度上作业后直径大于 $10\mu m$ 的云滴已经消失,小云滴也明显变少整个云滴数浓度已经小于 10 个/ cm^3 ,这与垂直分布的显示的情况相对应。从上述三个高度的变化看,除了大于 $15\mu m$ 的大云滴减少外, $5\sim 10\mu m$ 的云滴也变少了,而小于 $5\mu m$ 的云滴减少较少。在 3300m 以下整个作业前后的云滴谱分布没有较大的差异,只有在 3300m 时大于 $20\mu m$ 的云滴作业后有略微减少和 3000m 高度上作业后的云滴变少,但是谱型保持一致,前后云滴数浓度密度变化在一个数量级内。

通过对云滴谱分布的比较分析可知,作业半小时后垂直方向影响厚度小于 900m,播撒吸湿性高浓度粒子群后对于云内大于 $15\mu m$ 的大云滴有较明显的清除作用。这可能是由于催化剂播撒后由于重力作用下沉与大云滴相碰并使得大云滴掉落出云外,同时吸湿作用使得小云滴蒸发变少。另外,就是粒子群下落造成云中下沉气流,空气压缩增温使云滴蒸发,并保持比周围云体较冷而继续下沉。随着高度的下降催化剂扩散的范围增大,空间浓度变低影响能力变小。从微物理观测结果显示播撒吸湿性催化剂的消云作业只能影响一定厚度的云体,影响的范围与播撒剂量有一定的关系。

在 2005 年 9 月 13 日播撒作业后,在播撒的轨迹上云顶出现一条明显云沟(见图 7)。

3 奥运会开幕式日保障情况

3.1 2008 年 8 月 8 日天气形势^[16]

8 月上旬影响我国的天气系统主要有西

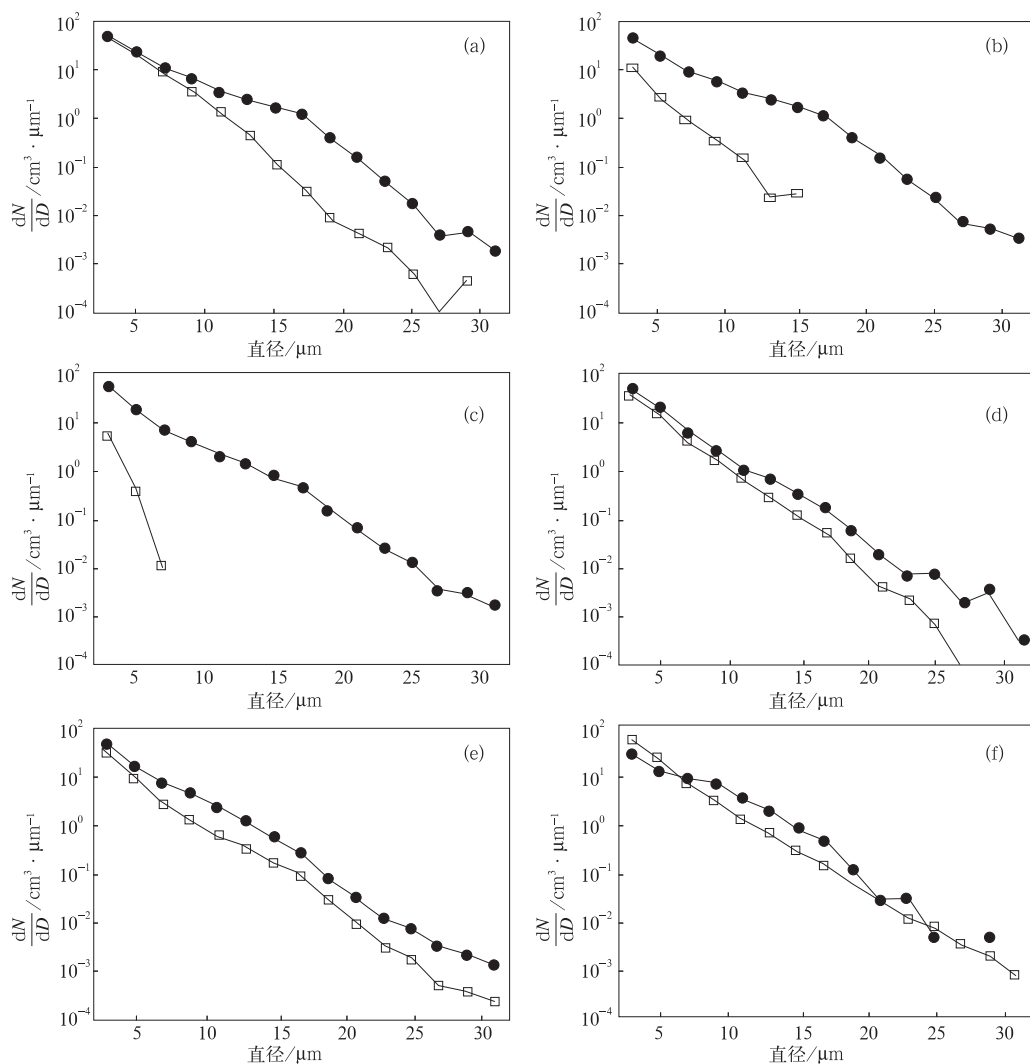


图6 2005年9月12日作业前后不同高度云滴谱分布特征

●为作业前(10:25—11:00), □为作业后(11:25—11:30)

(a) 4200m; (b) 3900m; (c) 3600m; (d) 3300m; (e) 3000m; (f) 2700m



图7 2005年9月13日作业后云沟照片
(17:12 飞机航摄, 高度: 4500m)

风槽、西太平洋副热带高压及此高压南部的台风(图略)。北京地区较长时间处于副高外围, 暖湿空气不断向北京地区输送。2008年8月8日副热带高压开始东退、减弱, 午后副热带高压进一步东退、北抬; 傍晚, 天气系统演变为北京地区西北部受冷空气影响, 西南部受850hPa切变线影响(图8a, 见彩页), 同时地面倒槽形成, 并进一步加深(图8b, 见彩页)。受850hPa切变线和地面倒槽的影响, 北京西南不断有系统性对流产生, 并有向北

移动之势,同时北京西北部不断有冷空气分裂东移南压,南北天气系统有打通之势(图 8c、d,见彩页)。但由于北京西北部冷空气势力相对偏北,北京西北部冷空气只影响到北京昌平以北的地区,并且冷空气过了昌平中北部后逐渐向东北方向收缩。

20:30 不断有降雨云团从西北、东北和西南影响北京郊区,并向城区“合围”。北京市城区五棵松一带开始下雨;21:25 雷达监测显示,西南方向河北保定地区出现超强对流云团、云高接近 20km,向东北方向的北京房山区移动推进。根据中外气象专家联合预测,降雨一个半小时内将影响至“鸟巢”。

此外,门头沟、顺义、密云也出现较强局地新生对流云团。北京奥运会气象服务中心随即发布了雷电黄色预警。

3.2 作业情况

(1) 8 月 8 日中午前后,2 架作业兼探测飞机分别起飞进入北京西北部、西部和西南部进行云物理探测。另两架作业飞机 14:45 之后相继起飞对所观测云(系)进行吸湿剂播撒抑制作业(作业量 8t),飞机作业后,机上人员宏观观测发现作业区的云系减弱消散。

(2) 考虑到云系发展较快已影响到作业飞机安全,北京人影指挥中心从 16:08 开始分别向西北、正西和西南三个方向的作业区域发布了实战地面火箭作业 1 号指令,各作业分指挥中心迅速组织辖区内地面作业点对不稳定降水云(系)实施火箭拦截作业。截至 23:29,共组织实施了 20 轮地面消(减)雨拦截作业,累计发射火箭 1100 多枚,具体作业区域见图 9。

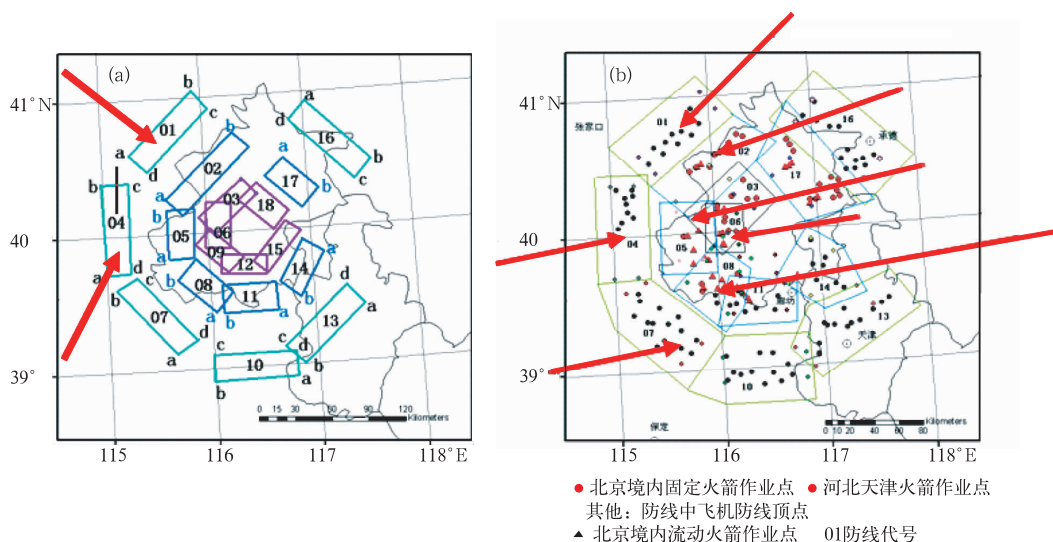


图 9 2008 年 8 月 8 日飞机、地面火箭主要作业区域

(a) 飞机作业区域; (b) 火箭作业区域 (箭头为 8 月 8 日具体的作业区域)

其中,14:45 开始,2 架军用运八飞机在北京境外西部(图 9a 中的 04 区)、西北部地区(图 9a 中的 01 区)进行人工消云。

16:08 和 16:56 针对北京西部(图 9b 中的 04 区和 05 区)850hPa 切变线云系及局地

降水云团,分别进行 2 轮人工消云减雨作业,作业量 86 枚火箭;

17:15 针对北京西北部(图 9b 中的 02 区)副高西北部冷槽降雨云团进行 1 轮火箭人工消云减雨作业,作业量 28 枚火箭;

18:16 针对北京中西部(图 9b 中的 06 区)出现的较强局地对流云团进行了 1 轮消云减雨作业,作业量 36 枚火箭;

18:45 到 19:06 针对北京西南部(图 9b 中的 08 区)出现的局地对流云团进行了 2 轮火箭消云减雨作业,作业量 24 枚;

19:35 到 20:18 针对北京西南部(图 9b 中的 08 区)不断发展加强的 850hPa 切变线云系及局地降水云团,分别进行 3 轮人工消云减雨作业,作业量 112 枚火箭;

20:53 到 21:05, 21:15 到 21:23 以及 21:17 到 21:25 针对北京西南部(图 9b 中的 08 区)的超强对流云团进行了 3 轮作业,作业量 45 枚火箭;

21:28 到 21:34 针对北京中西部(图 9b 中的 06 区)生成对流云团进行了作业,作业量 63 枚火箭;

21:45 到 22:00 针对北京西南部(图 9b 中的 08 区)的对流云进行了作业,作业量 138 枚火箭;

22:03 到 22:20 针对北京西南部(图 9b 中的 07 区、08 区)的强对流云,中西部(图 9b 中的 06 区)一带的局地对流云进行 2 轮作业,作业量 285 枚火箭;

22:25 到 22:45 继续针对北京西南部(图 9b 中的 07 区、08 区)一带系统的强对流云进行了 2 轮作业,作业量 119 枚火箭;

22:58 到 23:23 继续针对北京西南部(图 9b 中的 07 区、08 区)的强对流云,中西部(图 9b 中的 06 区)一带的局地对流云进行 3 轮作业,作业量 174 枚火箭;

23:29 后根据最新卫星资料和雷达资料进行分析,降水云系不会继续向北京城区移动,整个作业结束。

在整个作业过程中,北京人影办克服各种困难成功地保障了国家体育场不受风雨影响。

3.3 效果分析

针对 8 月 8 日副高西北部的冷槽云系和 850hPa 切变线云系,以及局地强对流云系,经过北京人影办 2 架飞机空中作业、20 轮地面火箭作业,使得位于增雨区的降水增大,在河北保定部分地区出现大到暴雨;位于减雨区的北京房山、门头沟、海淀、延庆等地的降水明显减小,或停止。雷达资料和卫星资料分析,作业效果比较明显。

3.3.1 降水资料分析^[17]

图 10 是 2008 年 8 月 8 日午后到夜间人工对降水天气过程进行干预后,北京地区 18:00—24:00 累计 6 小时降水量分布情况和 19:00—24:00 沿房山区的张坊、周口店,海淀区的大学生体育馆,朝阳区奥体中心,昌平的小汤山,密云的黑龙潭、冯家峪做的逐 5 分钟降水量时间演变图。可以看出,降水主要集中在北京的东北和西南部,北京城区处在无降水或降水比较少的豁口处,北京奥林匹克公园没有降水。

3.3.2 雷达资料分析^[18]

奥运会、残奥会期间北京境内有三部多普勒雷达连续进行探测,文中所采用的雷达回波平显(PPI)是由北京、天津、张北、石家庄四站组网 S 波段雷达所观测的组合反射率图,雷达回波高显(RHI)是对作业云系在一定方向的剖面,由于当时的气流方向为自西南向东北向流动,所以回波高显也是顺着气流方向进行的剖面。

北京人影办在 20:53—21:05, 21:15—21:23, 21:17—21:25 分别在房山的岳各庄、周口、长沟镇组织进行了消减雨作业,每个作业点各发射火箭 15 发,21:45—22:00 在房山的 10 个作业点均同时进行了消减雨作业,共发射火箭 138 发。两轮作业针对的

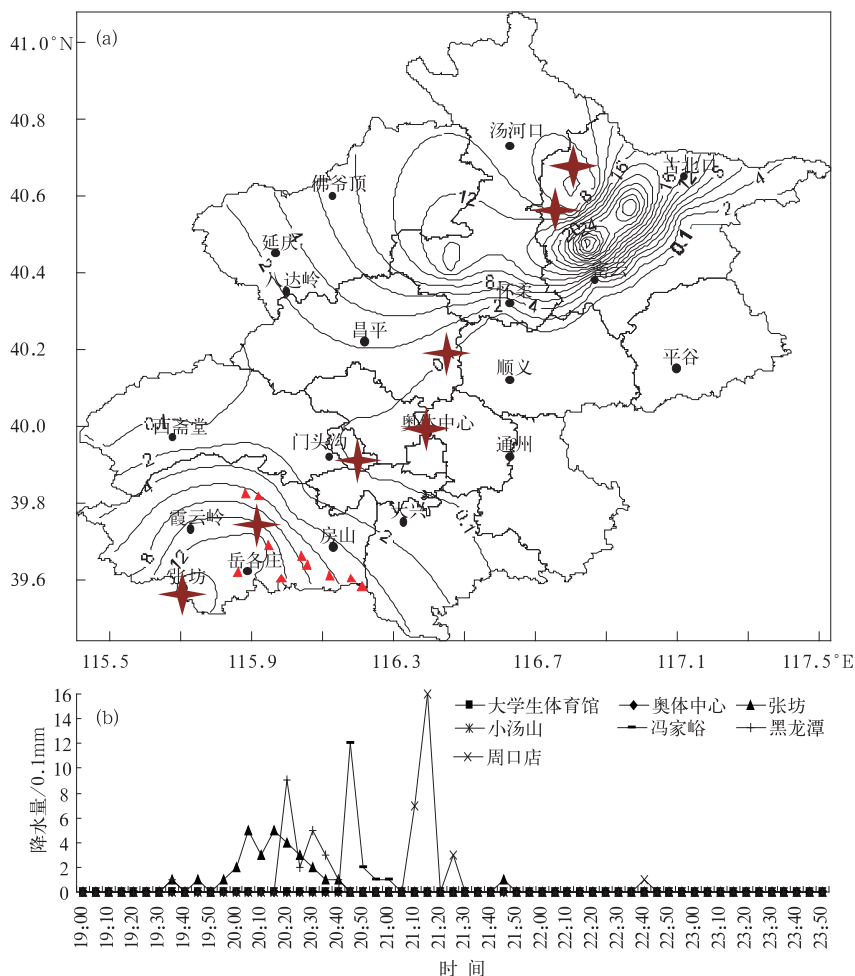


图 10 2008 年 8 月 8 日北京地区降水量图

(a) 2008 年 8 月 8 日 18—24 时北京地区累计降水量(单位:mm)分布,三角为北京房山区的作业点,十字星为 7 个自动站的具体位置,由西南往东北依次为张坊、周口店、大学生体育馆、奥体中心、小汤山,密云县的黑龙潭、冯家峪);(b) 2008 年 8 月 8 日 19—24 时部分自动站逐 5 分钟降水量时间演变图

是同一个云系,对该两轮的作业效果放在一起分析。

该作业云系的演变情况是:首先在 19:00 左右,在北京西南方向的保定地区出现了一块雷达回波,该回波随着时间的推移逐渐加强并自西南向东北方向移动,在 20:00 左右回波前沿进入北京区域,到 20:18 该回波强度逐渐减弱,并有分裂成东西两块的趋势,到 20:30 该块回波基本分裂成东西两块,强度由最强时的 55~60dBz 降为 45dBz 左右,同

时在该块回波的南方,新生了一块对流回波。在 20:42 西块的回波再次加强,强度增加到 55dBz 左右,并继续向东北方向移动,直接威胁奥运主场馆鸟巢,而南方新生的回波也迅速加强到 55dBz 左右(图 11,见彩页)。

针对此轮消减雨作业的效果分析,选择自 20:48 的南郊雷达观测资料开始,每隔 6 分钟一次,持续分析到作业后的 22:06。同时选择其南方的对流回波作为对比云系进行效果分析。从作业云的雷达回波组合反射率

(图 12, 见彩页)、高显变化图(图 13, 见彩页)可以看出作业后雷达回波强度明显减弱, 尤其是在 21:45—22:00 作业后, 雷达回波出现一个明显的缺口(图 14, 见彩页), 作业后雷达回波趋于消散, 北京西南部的雷达回波在 23:00 左右基本彻底消散。而对比云回波图的组合反射率(图 12, 见彩页)、高显变化图(图 15, 见彩页)则变化不明显。在 22:06 以后, 作业区的雷达回波继续消散减弱, 大约在 23:00, 北京西南部的雷达回波彻底消散; 对比区的雷达回波维持的时间则相对较长, 其消散的时间大约在 24:00。

图 16 反映的是四个时次的各档强度的雷达回波面积变化, 可以看出回波变化的明显的特征是强回波面积逐渐减少, 而弱回波面积则在逐渐增加。

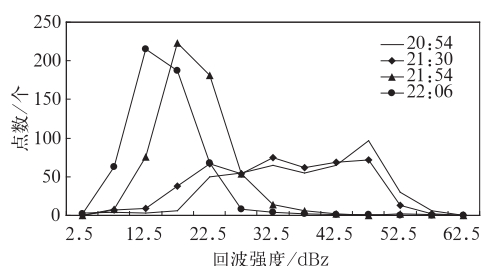


图 16 作业云不同档回波强度的面积随时间的变化

3.3.3 卫星资料分析

国家气象中心目前已发布多种 FY-2C 卫星反演云宏观物理特征参数。在此主要利用现场实时运行得到的产品, 选取云顶高度和云粒子有效半径参量, 分别从云体宏观特征、云微观特征和云内液水的变化来探寻碘化银过量引晶作业可能的物理响应^[19-21]。

(1) 云顶高度

卫星反演的云顶高度分布显示(图 17, 见彩页), 8 月 8 日夜间 18 时至 23 时北京市周边地区存在较强的对流云团, 尤其西南和

东部地区云体发展较为旺盛。西南方向河北省保定地区境内对流云团顶高在 10km 以上, 并且向东北向往北京市房山区逐渐逼近。另外, 北京市东部和东北部密云县、平谷区、顺义区一带云顶高度也接近 10km, 云团移动缓慢且有向城区推进趋势。

图 18(见彩页)云顶高度随时间的变化显示, 21:01 至 22:33 北京市西部出现大范围云层, 自西向东移近中云顶高度有所加强, 使得北京市门头沟和房山区上空很快充满 5~6km 高的云体。而顶高大于 7km 的较强云团在移进房山区后没有继续北伸, 转而向南收缩逐渐移出北京市。

由图 18c 可以注意到, 22:00 在房山区南侧出现一个非常明显的云空隙, 对应于地面火箭作业点西侧上空云顶高度骤降。选取格点 P(39.65°N、115.70°E)以其为中心并在其南北、东西向再各选取两个格点对云顶高度作五点算术平均来看(见表 4), 21:33 对应 P 位置的云顶高度较半小时前变化不大, 降低 100m, 而至 22:00, 顶高降低幅度达 2270m, 云体显著减弱。之后, 随着西侧云团的移进, 云体顶高又略有升高。

表 4 不同时刻云顶高度

时刻	21:01	21:33	22:01	22:33
云顶高度/m	6490	6390	4120	5400

(2) 粒子有效半径变化

地面火箭作业将携带的大量碘化银催化剂播撒入云, 这些人工冰核遇到过冷水后能够形成大量的小冰晶, 继而参与并影响云降水过程。从图 19(见彩页)可以看出卫星反演的北京市西部云层粒子尺寸总体偏小, 卫星反演的粒子有效半径集中在 14μm 左右, 加上云顶不高, 不利于形成降水。而西南部较强对流云团粒子有效半径大多集中在 20μm, 尺寸较大的约 30μm, 较利于降水形成和发展。

随着西部和西南部云体的不断移近,房山区上空很快即布满云层。21 时 30 分房山区南侧云粒子尺寸较前半小时又有所增大,之后则趋于减小。而在地面火箭点位置及其附近容易看到存在一些有效半径较小分布区域,云粒子尺寸普遍低于 $15\mu\text{m}$ 。

选取的 P 位置云粒子有效半径在 21 时和其后的半小时变化很小,均大于 $25\mu\text{m}$ 。而到了 22:00,对应该位置上空的粒子有效半径降至 $11.5\mu\text{m}$,尺寸明显减小,这可能与碘化银过量引晶作业在云内生成大量的小冰晶有关(见表 5)。

表 5 不同时刻粒子有效半径

时刻	21:01	21:33	22:01	22:33
粒子有效半径/ μm	26.4	26.5	11.5	12.5

4 结语

依托北京市科委重点课题“奥运期间人工防雹、消雨作业试验”,经过 7 年精心准备和 2008 年不懈努力,奥运会、残奥会开闭幕式人工消减雨技术得到不断提高和完善。

(1) 经过前期有关奥运会、残奥会开闭幕式人工消减雨保障技术调研、论证、试验,提出了人工消减雨的主要技术思路,通过统计分析 8、9 月影响北京地区降水天气系统及其来向,并确定了奥运会、残奥会人工消减雨 18 个作业区;2005 年 9 月在北京周边做了消云试验,对单个对流云单体来说,对其作业可以使云体消散;对层状云进行作业后,出现云沟;充实了奥运会、残奥会开闭幕式人工消减雨保障技术,演练了流程,锻炼了队伍。

(2) 2008 年 8 月上旬影响我国的天气系统主要有西风槽、西太平洋副热带高压及此高压南部的台风。8 月 8 日傍晚,副高西北部的冷槽云系影响北京北部地区,850hPa 切变线云系南压到北京西南部,北京地区地面倒槽加深,同时北京西部地区局地出现强对

流天气。天气系统的发展有利于北京西南部强对流(部分时段出现超强对流天气)向北京城区移动,北京地区北部的冷槽云系有可能和西南部的切变线云系打通,21:25 奥运气象服务中心发布雷雨黄色预警。

(3) 根据天气系统的演变和云系的移动情况,对有可能影响北京城区的云系进行干预作业影响。先后采用空中飞机作业方式和地面火箭作业方式对云系进行干预,飞机在河北省张家口地区(奥运消减雨作业区的 01 和 04 区)进行消云作业。在飞机作业条件不具备的情况下,及时启动地面火箭作业,从 16:08 开始到 23:30 左右先后在沿降水云系移动的路径不同区域进行了 20 轮火箭作业,发射火箭弹 1110 枚。傍晚后主要在北京西南部对系统性的强对流云团和西部局地产生的对流云进行作业。

(4) 地面火箭大规模消云减雨作业后,雷达回波强度明显减弱,雷达回波趋于消散,尤其是在 21:45—22:00 作业阶段,雷达回波出现一个明显的缺口。对雷达回波按强度分档,从各档强度的雷达回波面积变化可以看出,回波变化的明显的特征是强回波面积逐渐减少,而弱回波面积则在逐渐增加

(5) 卫星资料反演的云顶高度和云粒子有效半径也能比较清楚地显示出大规模作业后的效果。22:00 前后经过大规模作业后在房山区南侧出现一个非常明显的云空隙,对应于地面火箭作业点西侧上空云顶高度骤降。以点(39.65°N、115.70°E)为中心并在其南北、东西向再各选取两个格点对云顶高度作五点算术平均来看,21:33 该点的云顶高度较半小时前变化不大,微弱降低 100m,而至 22:00,顶高降低幅度达 2270m,云体显著减弱。之后,随着西侧云团的移进,云体顶高又略有升高。

从卫星资料反演的相应时刻的粒子有效半径可以看出,北京地区西部云层粒子尺寸

总体偏小,卫星反演的粒子有效半径集中在 $14\mu\text{m}$ 左右,加上云顶不高,不利于形成降水。而西南部较强对流云团粒子有效半径大多集中在 20 几个微米,尺寸较大的约 $30\mu\text{m}$,较利于降水形成和发展。点 (39.65°N 、 115.70°E) 位置云粒子有效半径在 21:00 和其后的半小时变化很小,均大于 $25\mu\text{m}$ 。而到了 22:00,对应该位置上空的粒子有效半径降至 $11.5\mu\text{m}$,尺寸明显减小,这可能与碘化银过量引晶作业在云内生成大量的小冰晶有关。

参考文献

- [1] 秦长学.北京市综合增雨技术简介[J]. 气象, 1999, 25(7):34-36.
- [2] 汪晓滨,张蓄,陈跃,等. 新型 AgI 末端燃烧器在北京飞机增雨作业中的使用分析[J]. 气象, 2005, 31(7):54-58.
- [3] 汪晓滨,吕亚丽,王广河,等. Matlab 在北京飞机增雨航迹分析中的应用[J]. 气象, 2006, 32(7):46-51.
- [4] 赵习方,张蓄,秦长学,等. 实施飞机人工增雨对密云水库水质中 Ag^+ 影响研究[J]. 气象, 2006, 32(5):46-51.
- [5] 张纪淮,王广河,关立友,等. 人工消雨. 第十四届全国云降水物理和人工影响天气科学会议(下册)[G]. 北京:气象出版社,2005:611-620.
- [6] 叶家东,范蓓芬,杜京朝. 人工增雨试验中的反效果问题[J]. 应用气象学报,1998,9(3):336-344.
- [7] Braham R R Jr, Flueck J A. Some Results of the White top experiment, Preprints of Second National Conference on Weather Modification[G],1970:176-179.
- [8] Rosenfeld D, Farbstain H. Possible influence of desert dust on seed ability of clouds in Israel[J]. J. Appl. Meteor., 1992,31(3): 722-731.
- [9] Dennis A S, Kosciusko A. Results of a randomized cloud seeding experiment in South Dakota[J]. J. Appl. Meteor., 1996,8(4):556-565.
- [10] 李曾中,程明虎,李月安. 利用人工降雨手段化汛期特大暴雨灾害为可利用水资源[J]. 灾害学, 2002, 17(3): 30-34.
- [11] 张纪淮,苏正军,关立友,等. 人工影响天气几个前沿科技问题的研究与思考(II). 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[G],北京:气象出版社,2005:753-754.
- [12] Korneev V P, Petrov V V, Diadyuchenko V N et al. Results of cloud seeding operations to modify weather conditions over cities[G]. Eighth WMO Scientific Conference on Weather Modification, 2003:227-230.
- [13] 别拉耶夫. “95·5·9”莫斯科多架飞机人工消云和减弱降水试验[J]. 新疆气象,1998,21(3): 44-47.
- [14] M·纳伯格,谢义炳. 人工影响天气现状评述[J]. 气象科技, 1974,2(1):20-22.
- [15] 黄梦宇,张蓄,魏强,等. 2005 年北京消云试验微物理检验[J]. 气象,2008,34(增刊):191-194.
- [16] 董鹏捷,康玉霞,刘建忠. 北京 2008 奥运开幕式日消(减)雨过程降水响应分析[J]. 气象,2008,34(增刊):141-144.
- [17] 刘建忠,董鹏捷,嵇磊,等. 奥运会开幕式天气形势分析[J]. 气象,2008,34(增刊):158-161.
- [18] 何晖,马建立. 人工消减雨作业雷达回波特征综合分析[J]. 气象,2008,34(增刊):145-149.
- [19] 李宏宇,周崑,周毓荃,等. 人工消(减)作业中卫星反演云特征参量变化[J]. 气象,2008,34(增刊):136-140.
- [20] 陈英英,周毓荃,毛节泰,等. 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,2007, 33(4):29-34.
- [21] 周毓荃,陈英英,李娟,等. 利用 FY-2CD 静止卫星等综合观测资料联合反演云宏微观物理特性参数产品及初步检验[J]. 气象,2008,34(12):29-39.

张蕾等:北京2008年奥运会开幕式人工消减雨作业

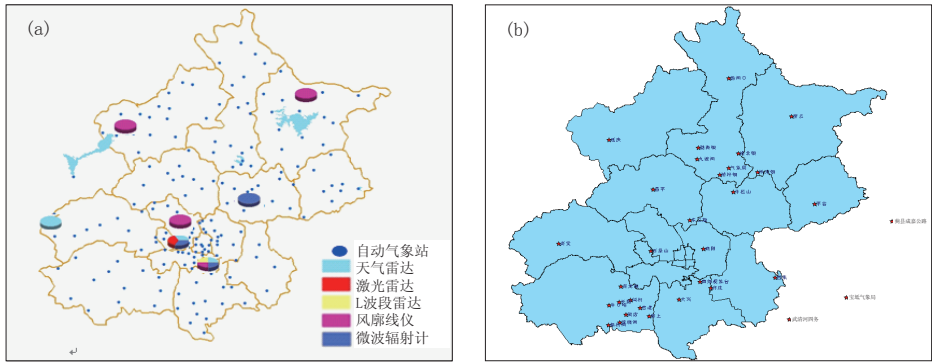


图 3 北京区域气象观测系统布局
(a) 自动气象站及雷达探测系统; (b) GPS水汽探测系统

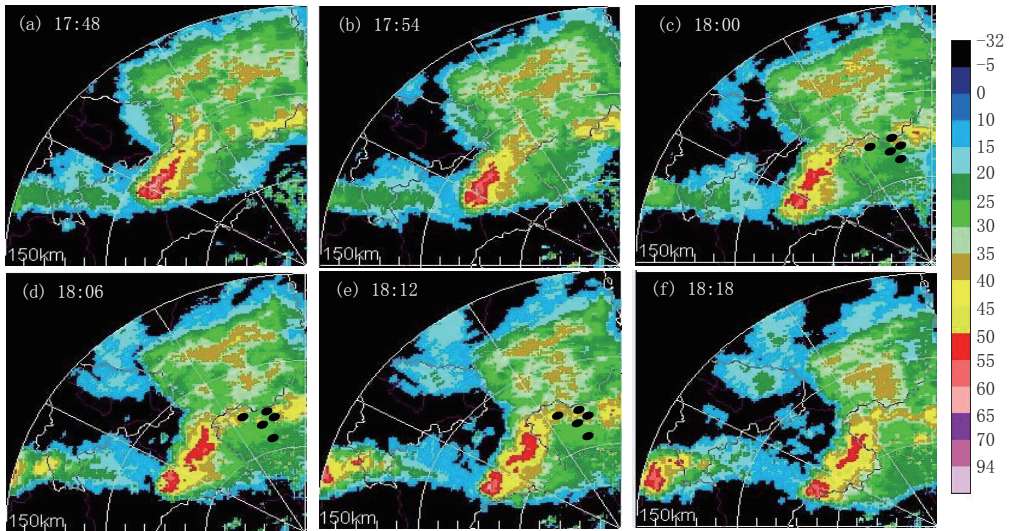


图 4 2006年7月12日作业雷达回波反射率变化图 (黑点代表该时刻的作业点)

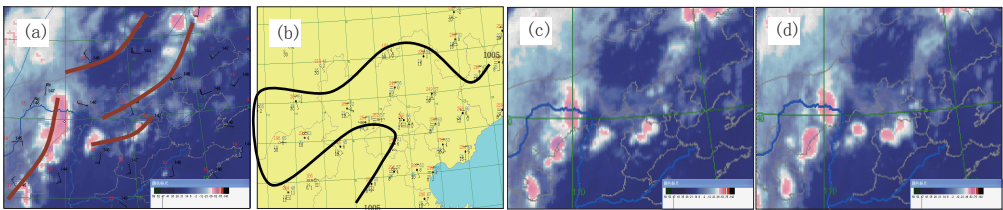


图 8 2008年8月8日卫星云图和地面形势
(a) 20时云图和850hPa形势; (b) 23时地面形势; (c) 21时云图; (d) 22时云图

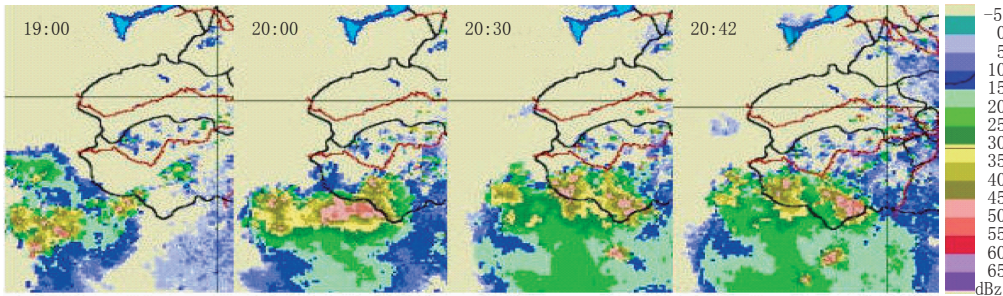


图 11 2008年8月8日云系前期雷达回波组合反射率变化

张蔷等:北京2008年奥运会开幕式人工消减雨作业

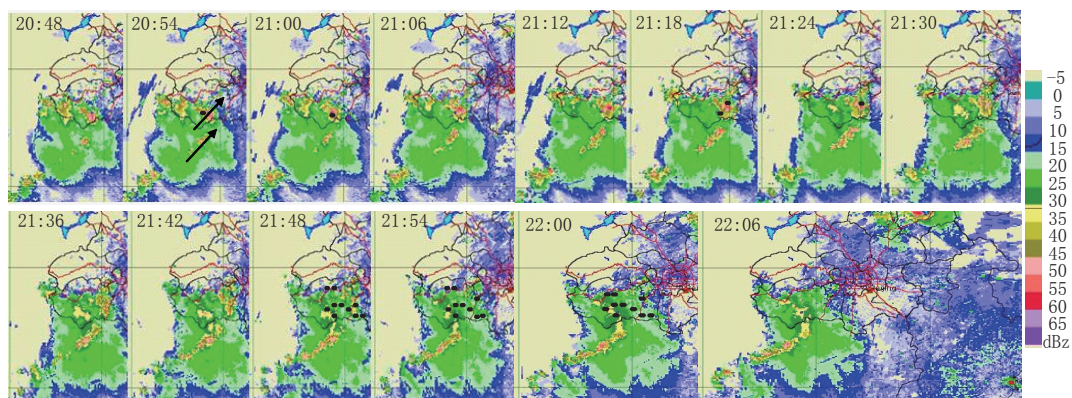


图 12 2008年8月8日20:48-22:06雷达回波组合反射率图
(黑点代表该时刻的作业点, 箭头分别代表作业云和对比云高显的剖面方向)

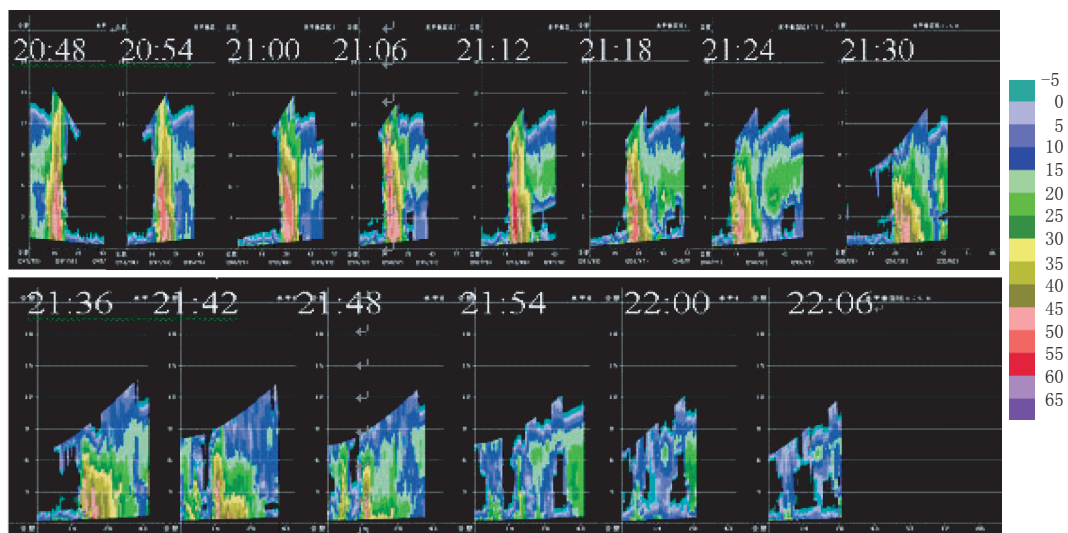


图 13 2008年8月8日20:48-22:06作业区云回波高显变化图 (每6分钟一张)

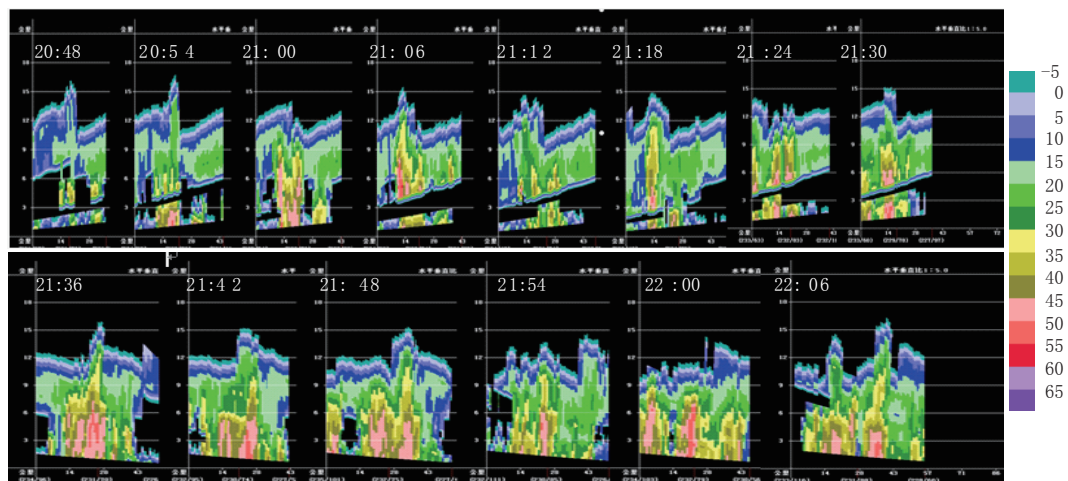


图 15 2008年8月8日20:48-22:06对比区云回波高显变化图 (每6分钟一张)

张蕾等:北京2008年奥运会开幕式人工消减雨作业

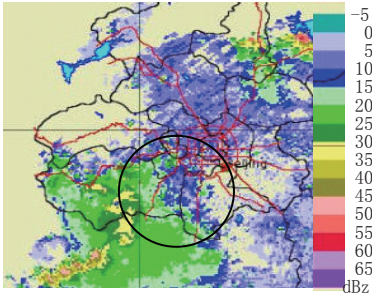


图 14 2008年8月8日22:12雷达回波组合反射率图
(实线区域为雷达回波缺口区)

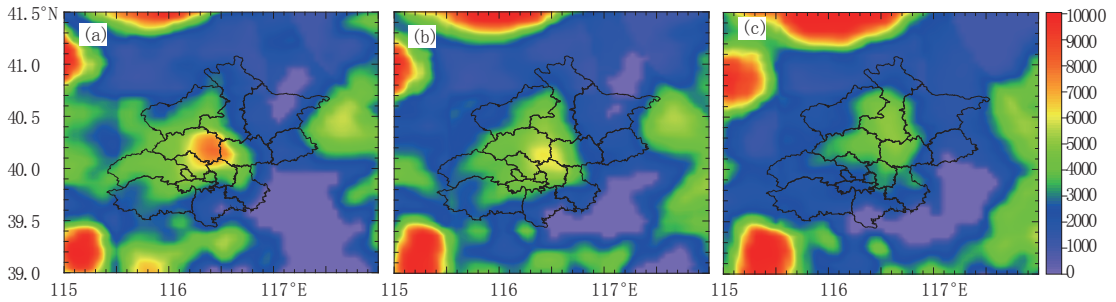


图 17 2008年8月8日18:01-20:33卫星反演的云顶高度分布图 (单位: m)

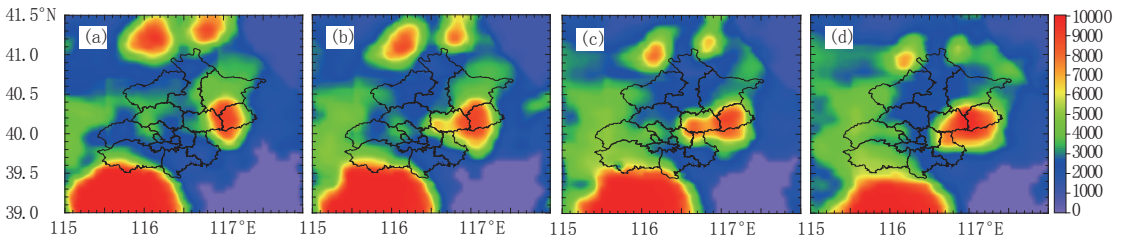
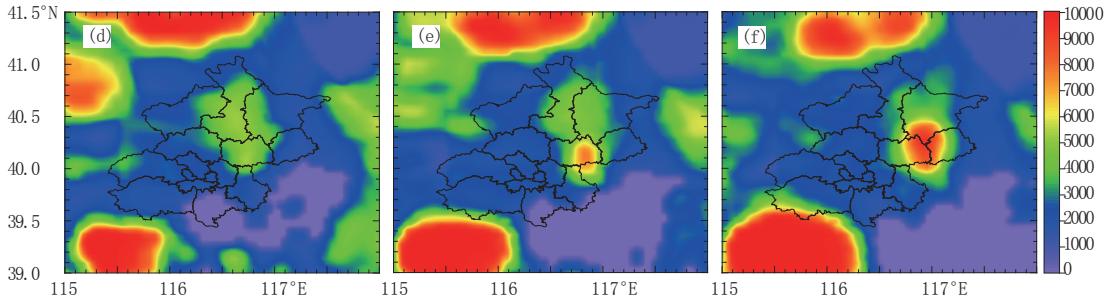


图 18 2008年8月8日云顶高度分布 (单位: m)

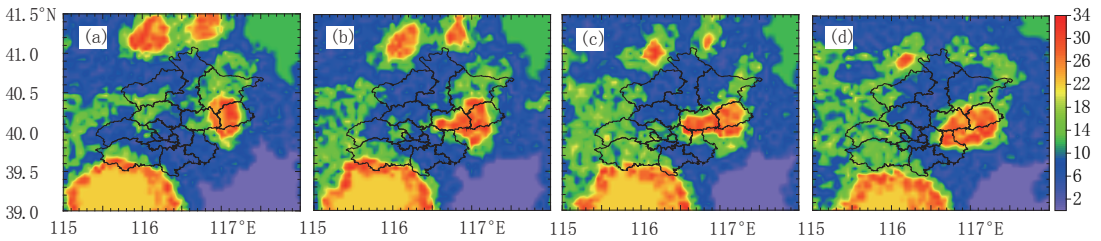


图 19 2008年8月8日粒子有效半径分布 (单位: μm)