

王庆,樊明月,张洪生.一次防雹作业过程的效果分析[J].海洋气象学报,2018,38(2):96-102.

Wang Qing, Fan Mingyue, Zhang Hongsheng. Effect analysis of a hail suppression operation in Shandong[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(2): 96-102. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.02.012. (in Chinese)

一次防雹作业过程的效果分析

王庆,樊明月,张洪生

(山东省人民政府人工影响天气办公室,山东 济南 250031)

摘要: 利用2008年5月23—26日山东一次冰雹过程的常规气象资料,分析了此次冰雹形成的天气形势、层结条件及其触发机制等;分析了两个极相似云体在催化和未催化情况下从初生、发展到消亡的演变特征。结果表明,防雹作业加剧了冰雹云的消亡过程,表现为回波强度减弱、回波高度下降、VIL减小、生命史缩短等特征。通过对对流云系的横向和纵向对比分析,收集了18个防雹作业样本,并利用这些样本作业前后的回波强度和回波高度两个物理量进行统计检验,在显著性水平分别为1%和5%的情况下,防雹作业后回波强度减弱、回波高度下降,即防雹作业有效。利用济南防雹作业数据对防雹作业效果进行的模拟定量检验表明,防雹作业可减少降雹约27%。

关键词: 人工防雹; 作业效果; 检验方法

中图分类号: P482 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)02-0096-07

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.02.012

Effect analysis of a hail suppression operation in Shandong

WANG Qing, FAN Mingyue, ZHANG Hongsheng

(Weather Modification Office of Shandong Province, Jinan 250031, China)

Abstract The conventional meteorological data of a hail process happened in Shandong from 23 to 26 May 2008 are used to analyze the synoptic situation, stratification conditions, trigger mechanism of the hail process, and the evolution characteristics of two very similar clouds from primary state to disappearance under catalysis and non-catalysis. It indicates that the hail cloud is intensified to disappear by the hail suppression operation, which is manifested as weakened echo intensity, reduced echo height, decreased VIL and shortened duration. The contrastive analysis of convective clouds in horizontal and longitudinal direction helps to collect 18 samples of hail suppression operation, whose echo intensity and echo height before and after the operation are used to do statistical test. It is found that when the significance level reaches 0.01 and 0.05, the echo intensity is weakened and the top height goes down, and the effect of hail suppression operation is obvious. By using the three-dimensional hail cloud numerical model and the seeding amounts, the effect of hail suppression operation is studied, and the hail suppression operation can reduce the hail of about 27%.

Key words hail suppression; operation effect; test method

收稿日期:2017-12-18; 修订日期:2018-03-05

基金项目:山东省气象局气象科研项目(2015sdqxm07)

作者简介:王庆,女,硕士,高级工程师,主要从事人工影响天气保障及相关的科研工作,wq9813@sohu.com。

引言

冰雹灾害是由强对流天气系统引发的剧烈的气象灾害,虽然出现的范围小、时间短,但由于其来势猛、强度大,常常给国民经济特别是农业生产造成严重损失。人工防雹在我国有很长的历史,20世纪50年代,中国气象局和中国科学院等组织开展了以人工增雨和人工防雹为主的人工影响天气科学实验,并陆续在许多省市开展^[1-2]。冰雹是山东省主要的自然灾害之一,几乎年年都有发生。山东有组织的人工影响天气工作始于1955年,包括人工增雨、人工防雹以及人工防霜等试验^[3]。1987年德州、济南率先恢复开展了高炮人工增雨防雹作业,到20世纪90年代中期山东17个市全部恢复开展了增雨防雹工作。随着人工防雹工作的不断发展,用高炮和火箭进行人工防雹作业已成为减少和减轻冰雹灾害最有效的措施和手段,并取得了显著的社会和经济效益。

国内针对防雹作业效果以及相关的检验方法开展了一系列的研究,王雨曾等^[4-5]研究发现,防雹作业后雷达回波高度、回波强度以及30 dBz强回波高度比作业前明显减小。洪延超^[6]、李宏宇等^[7]、康凤琴等^[8]利用数值模式模拟了不同冰雹云的用弹量。李金辉等^[9-10]分析了防雹作业前后冰雹云雷达回波的变化。本文利用2008年5月23—26日在山东出现的一次冰雹天气过程资料,分析了两块极相似对流云团,一块进行催化作业、另一块未进行催化作业下其回波强度、回波高度、累积液态含水量(VIL)等参数的变化特征;建立了防雹作业效果的检验思路,并采用统计检验以及模拟检验等方法对防雹作业效果进行了检验,希望为人工防雹作业效果检验提供一些参考依据。

1 资料

人工防雹作业效果检验所用的资料有:1)山东123个国家级气象观测站观测的冰雹资料。2)冰雹灾情资料。3)济南(齐河)多普勒天气雷达观测资料。4)防雹作业宏观资料。5)常规气象观测资料。

2 天气和防雹作业实况

2008年5月23—26日,受高空冷涡影响,山东出现了一次大范围的冰雹天气过程,鲁西北、鲁中、鲁北地区先后遭到了冰雹天气的袭击。据山东省气象台灾情统计,5月23—24日淄博市城区、沂源

县出现冰雹,未成灾;临沂市沂水、费县、蒙阴县出现冰雹灾害,受灾面积2 602.5 hm²;5月24—25日齐河县晏城、大黄、宣章出现了冰雹灾害,受灾人口13 700人,受灾面积600 hm²,直接经济损失296万元。针对此次过程,滨州(惠民)、德州(齐河和临邑)、济南(济阳)、莱芜、临沂(沂水、费县、平邑和蒙阴)、淄博(沂源、高青、桓台和淄川)、东营(河口)等7市14县(市、区)53个作业点先后组织开展了60轮次人工防雹作业,作业时段主要在23日14:34—24日23:50以及26日03:30—04:40,共发射炮弹1 713发、火箭弹8枚。

3 天气形势和层结条件分析

由23日08时—24日08时500 hPa(图略)演变形势可以看出,新地岛—贝加尔湖地区为宽广的低压区,低压槽的南部受冷平流影响,不断发展加深,其北部受暖平流影响,减弱北收;到24日08时,500 hPa东北地区已形成了东北—西南向的椭圆形冷涡,涡后有冷中心,冷涡继续发展加深,贝湖附近的高压脊强烈发展。700 hPa和850 hPa也有相应的低压中心配合,形成了比较深厚的高空冷涡系统。850 hPa自23日08时起,西南地区有暖脊向东北方向伸展,山东—华北东部—东北地区均为庞大的暖脊控制,午后开始,鲁中山区开始出现了冰雹天气。24日08时,从河套地区伸向鲁中一带的暖舌进一步加强,鲁西北地区出现中尺度切变线。地面图(图略)上华北中南部到山东维持低压槽区,深厚的辐合系统为低层水汽和动量的输送提供了良好的条件,上冷下暖的垂直结构加剧了大气层结的不稳定,为强对流天气的发展提供了较好的条件。午后一夜间,山东再次出现了冰雹天气,且持续时间更强、范围更大。

济南章丘站23日20时 t -ln p 图(图1a)显示,整层大气为负的不稳定能量,且存在着明显的干湿层分布,850 hPa、600 hPa和400 hPa几乎达到饱和。24日08时(图1b),整层大气的干湿分层仍比较明显,700 hPa以上出现了正的不稳定能量,−20℃层高度有所下降,表明高层有冷空气入侵,层结更不稳定。24日20时(图略),整层大气仍具有明显的干湿分层和正的不稳定能量区,−20℃层高度较08时有所升高,表明高层冷空气强度减弱。25日08时(图略)整层大气为负的不稳定能量,干湿分层不明显,湿度下降,层结趋于稳定,冰雹形成的有利条件开始崩溃。

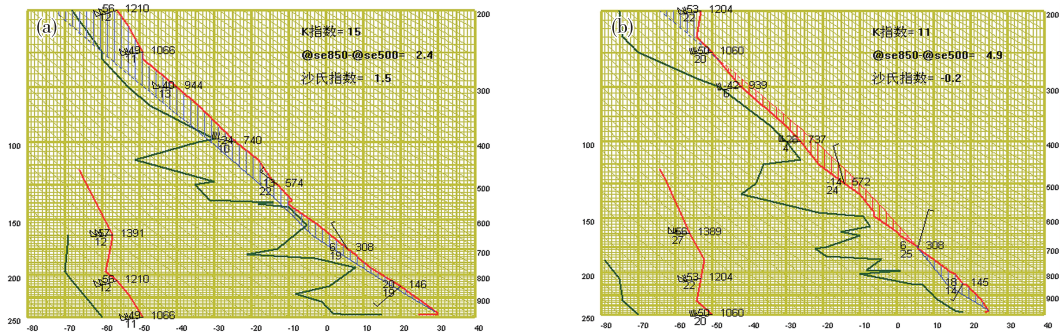


图 1 济南章丘站 t - $\ln p$ 图(a. 2008 年 5 月 23 日 20 时,b. 2008 年 5 月 24 日 08 时)
Fig.1 Two t - $\ln p$ diagrams from Zhangqiu Station (a. 20:00 on 23, b. 08:00 on 24 May 2008)

此次冰雹过程是在大尺度天气背景下,大、中、小尺度系统相互作用的结果。天气形势、水汽垂直分布以及层结条件对强对流天气的发生具有良好的指示意义,而地形抬升、局地热力环流和中尺度辐合是此次强对流天气的触发机制。

4 回波演变特征

济南(齐河)雷达观测发现,23 日中午前后对流云团首先在地势较高、局地热对流多发的沂源出现。13:00—22:00 不断有对流单体在临沂、淄博等地发展,然后减弱消失,云团主要表现为孤立发展的对流单体,水平范围数十千米,生命史较短,从生成到消亡约 1~2 h,单体之间呈现离散的分布特征(图略)。

24 日对流云团特征主要表现为 3 个阶段:1) 13:00—16:00,对流云团主要表现为孤立发展的对流单体,对流云团主要出现在临沂、莱芜、淄博等鲁中山区,山区地形抬升作用是触发对流云的主要机制。2) 16:00—20:00,零散的对流单体突然开始组织化,并逐渐形成有规律的带状对流云带,之后对流云带进一步发展并向西移动,19:00 前后回波又开始减弱并逐渐消失。3) 24 日 20:30—25 日凌晨,对流云团开始强烈发展,主要出现在济南、德州、滨州和淄博一带,即 850 hPa 鲁西北地区中尺度切变线前部,说明中尺度切变线前部的辐合上升气流再次触发了对流云团的发展,云团发展迅速,对流单体排列形成统一的多单体雷暴群,并呈现出规律性的移动特点,移动速度较慢、生命期较长,从生成到消亡长达 4~5 h(图略)。

5 防雹作业效果分析

5.1 两块极相似云体雷达回波参数的演变

蒙阴和沂源县同属鲁中山区丘陵地带,且南

北交界,下垫面相似。23 日下午开始,受下垫面热力作用的影响,两县境内分别出现一块对流云团(以下蒙阴境内的对流云团简称对流云 1,沂源境内的简称为对流云 2)。图 2 是作业前(17:06—17:54)两块云团从初生到发展每隔 6 min 的回波演变图。由图可以看出,17:06 对流云 1 首先在新泰与蒙阴交界处开始生成,17:24 对流云 2 才开始出现,17:48 两块对流云大致呈椭圆形,其面积、形状、强度均比较相似,最大回波强度 60 dBz,回波高度 14 km(图略),此后两个时次对流云 2 的回波强度较对流云 1 略偏强。

17:57—18:25,沂源县 5 个炮点对对流云 2 开展了防雹作业,作业详情见表 1。蒙阴未开展防雹作业。

表 1 沂源防雹作业情况
Table 1 Hail suppression operation on convective cloud 1 in Yiyuan

炮点名称	用弹量/发	作业时间
许家庄(A)	10	17:57—18:02
南麻(B)	30	17:57—18:12
中庄(C)	50	17:57—18:22
悦庄(D)	10	18:08—18:13
东里(E)	19	18:08—18:18

图 3 是作业后(18:00—19:00)两块回波每隔 6 min 的发展演变图,图中红色字母标注的是该时次参与作业的炮点和炮点所在的位置。由图可以看出,18:18,即作业开始后 21 min,两块回波开始发生变化,对流云 2 回波强度开始减弱,对流云 1 则没有出现明显的减弱,相反在后面的两个时次还出现了增强的现象,其回波中心强度在 18:30 达 60 dBz。之后对流云 2 很快减弱消失,而对流云 1 直到 19:30

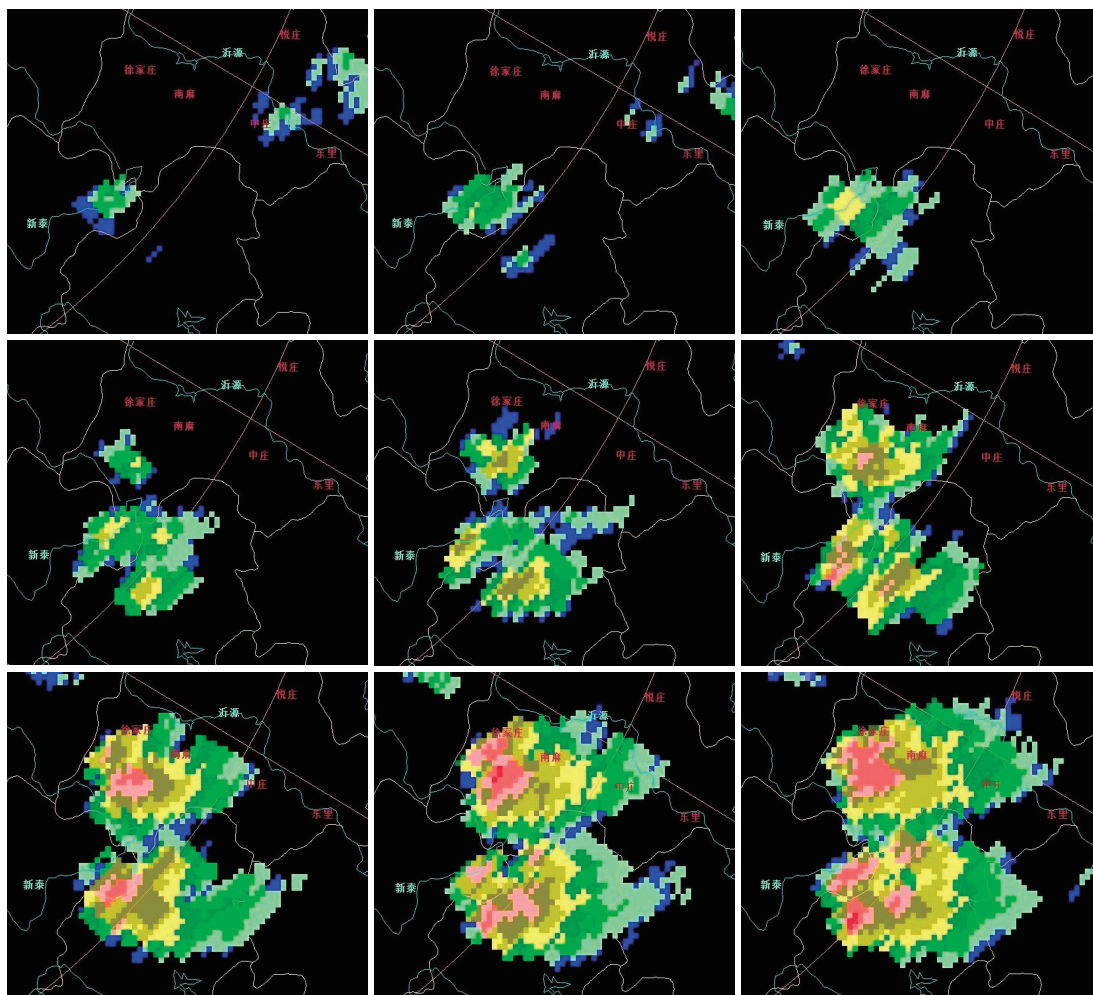


图2 2008年5月23日作业前(17:06—17:54)两块对流云团的演变(间隔6 min)

Fig.2 Evolution of two convective clouds before the seeding from 17:06 to 17:54 (at 6 min intervals) on 23 May 2008

左右才逐渐减弱消失,期间在蒙阴境内造成了冰雹灾害。

图4是两块对流云回波高度和垂直累积液态水含量(VIL)随时间的演变情况。由图可知,回波刚生成时,回波高度在5~9 km,此后云体发展迅速,特别是对流云2,回波高度在初生阶段剧增到11 km,说明对流发展非常旺盛。18:18,在对对流云2进行催化21 min后,其回波高度开始明显下降,而未催化的对流云1,其回波高度反而出现了上升的趋势,18:24达到了15 km。累积液态含水量也呈现出大致相同的变化趋势,对流云1的VIL在17:42—18:24出现了两次明显的跃增,且最大VIL达到了 $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,达到了山东春季冰雹云的指标^[11],对流云2虽然在初期发展得比对流云1更旺盛,但作业后21 min后,VIL迅速下降,云体很快崩溃。

上述研究表明,防雹作业加剧了冰雹云的消亡过程,表现为回波强度减弱、回波高度下降、VIL迅

速减小、生命史缩短等变化特征。

5.2 统计检验结果

5.2.1 统计检验样本的选取

在统计检验中,主要采用横向和纵向两种对比方法来获取作业样本。

横向对比主要通过对物理性质大致相似的两块冰雹云,一块实施催化、另一块未实施催化,通过其物理量的变化来对比分析防雹作业效果。

纵向对比是通过同一块对流云团作业前后其物理量的变化情况分析作业效果。

5.2.2 统计检验结果

通过上节介绍的横向和纵向两种对比分析方法,得到了5月23—26日防雹作业过程的18个样本资料(表2)。由表可见,防雹作业后绝大多数回波强度减小、回波高度降低。通过对作业时段和雷达回波演变的对比,发现24日费县作业时段偏早,作业期间冰雹云并未移过本地,而沂水作业时段偏

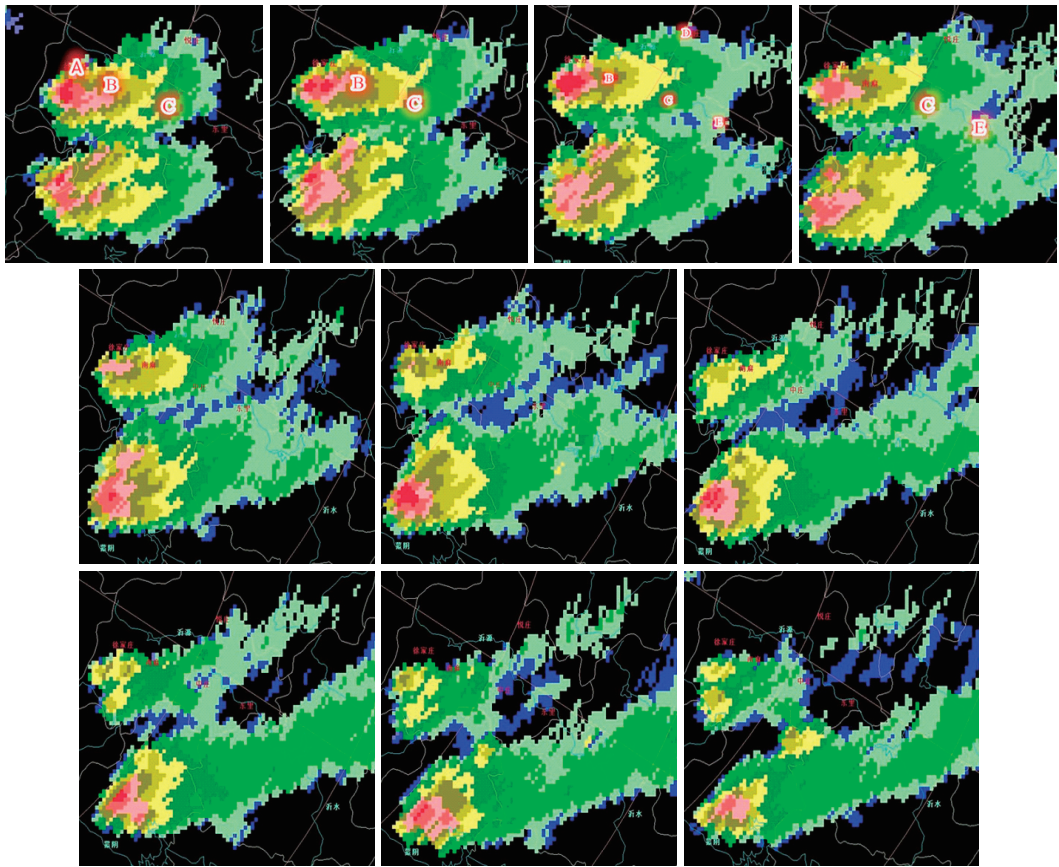


图 3 2008 年 5 月 23 日作业后(18:00—18:54)两块对流云团的演变(间隔 6 min)
Fig.3 Evolution of two convective clouds after the seeding from 18:00 to 18:54 (at 6 min intervals) on 23 May 2008

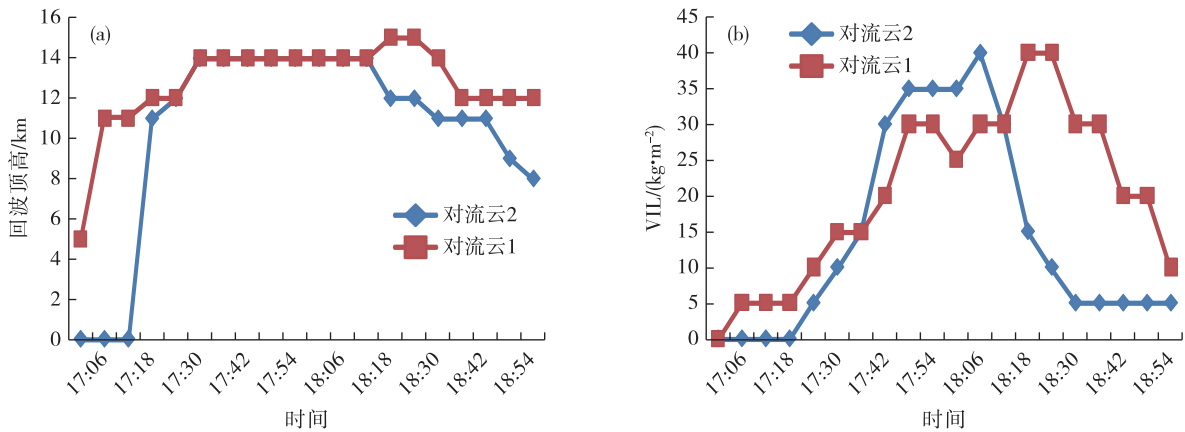


图 4 两块对流云回波高度和 VIL 随时间的演变情况(a.回波高度,b.VIL)
Fig.4 Temporal evolution of the echo height and VIL of two convective clouds (a. echo height, b. VIL.)

晚,主要是对冰雹云后部的普通降水云系进行催化的,因此这两个属于无效样本,故在物理统计检验中进行删除。另外,在剩下的 16 个防雷作业样本中,出现灾情的有 2 个,占总数的 12.5%;未出现灾情的有 14 次,占总数的 87.5%。用 16 个样本的回

波强度和回波高度两个物理量分别进行符号检验,在显著性水平分别为 1%和 5%的情况下,防雷作业后回波强度和高度变化是显著的,说明此次防雷作业有效。

表 2 2008 年 5 月 23—26 日防雹作业与雷达回波参数变化和灾情对比

Table 2 Statistical result of radar echo parameters and disasters during the hail suppression operation from 23 to 26 May 2008

日期	作业点	作业时段	作业前最大 回波强度/dBz	作业后最大 回波强度/dBz	作业前 回波高度/km	作业后 回波高度/km	灾情
5 月 23 日	沂源	14:34—16:11	55	50	11	9	无灾
		17:57—18:25	60	50	12	9	无灾
	沂水	19:07—19:17	45	35	9	9	无灾
		14:16—14:52	60	50	12	12	无灾
5 月 24 日	淄川	14:51—14:55	60	60	12	12	无灾
	蒙阴	16:45—17:42	60	55	15	11	有灾
	费县	18:13—18:15	0	0	0	0	有灾
	沂源	13:58—14:28	60	50	15	11	无灾
	沂水	17:35—17:45	25	25			有灾
	平邑	18:47—18:50	50	45	11	9	无灾
	莱芜	18:38—18:56	55	50	12	9	无灾
	济阳	21:24—22:41	60	55	12	11	无灾
	临邑	21:31—21:44	60	55	12	11	无灾
	惠民	21:39—21:45	65	60	12	12	无灾
	高青	21:50—21:58	65	60	12	12	无灾
	桓台	22:07—22:10	55	50	12	11	无灾
5 月 26 日	齐河	22:01—23:07	65	60	11	11	有灾
	河口	03:30—04:40	50	50	12	10	无灾

5.3 数值模拟检验

在数值模拟检验中,采用中科院大气所三维冰雹云模式以及湿热泡扰动方式激发初始对流云,即在模拟域中央附近低层加一位温扰动场和水汽场,通过垂直运动方程的浮力项触发初始对流来模拟防雹效果。

本次强对流过程中,济南市所属的济阳县于 24 日 21:24—22:41 开展防雹作业。在数值模拟中,结合现有探空资料与作业实况,选用 24 日 20:00 济南章丘站的探空资料作为初始场,催化剂按实际用量 210 g(炮弹 210 发)来进行计算,模拟时间控制在模

拟初始时刻后的 11 min 开始,在 10 min 内将 210 g 的 AgI 催化剂输送到过冷水含量极大值区进行试验,播撒格点共 9 个,分布在以最大过冷水含量点为中心、东西、南北各 1 km 的水平区域内,代表防雹过程中高炮同一仰角不同方位角的作业方式。

由三维冰雹云模式对 2008 年 5 月 24 日济阳防雹作业的模拟结果与实况(表 3)可知,模拟的回波高度和最大回波强度与实况非常接近,催化作业(真实催化量)后,降雹总量由 714.4 kt 减少到 593.5 kt,减少冰雹量为 27%,说明防雹作业是有效果的。

表 3 数值模拟结果与实况

Table 3 Numerical simulation results and the actual echo height and intensity

初始时间	最大回波强度/dBz		回波高度/km		降雹量/kt		冰雹减少量
	模拟	实测	模拟	实测	未催化	催化	
20080524T20	70	65	16	15	714.4	593.5	27%

6 结论

1)本次强对流天气是由典型的高空冷涡天气系统引起的,天气形势、水汽垂直分布以及层结条

件对强对流天气的发生具有良好的指示意义,地形抬升、局地热力环流和中尺度辐合作用是强对流天气的触发机制。

2)由局地地形抬升和热力对流触发的对流云

团以孤立发展的对流单体为主,水平范围小,生命期较短,单体之间呈现离散的分布特征。由低层中尺度切变线触发的对流单体发展迅速,移动速度慢,生命期较长,单体之间排列整齐,形成统一的多单体雷暴群。

3)通过对两块极相似对流云从初生、发展、成熟和消亡阶段其回波强度、回波高度、VIL等演变情况的分析,发现实施催化作业的对流云团出现了明显减弱的现象,即回波强度减小、对流顶高度下降、VIL减小、生命期缩短。而未实施催化作业的则出现了发展的趋势,生命期明显长于实施作业的云团。

4)防雹作业和灾情的直观对比分析表明,效果不明显的防雹作业存在投入装备少、作业时机不适合、总用弹量偏少等情况;直观分析表明,持续的大剂量的防雹作业能有效减少冰雹引起的自然灾害,特别是对孤立发展的对流单体,作业效果更好。

5)统计检验结果表明,用防雹作业前后回波强度和回波高度两个物理量分别进行符号检验,在显著性水平分别为1%和5%的情况下,防雹作业后回波强度和高度变化是显著的,说明本次防雹作业是有效的。

6)数值模拟检验结果表明,模式对本次冰雹过程雷达最大回波强度、回波高度等特征具有较好的模拟能力;利用济南防雹作业的真实数据对防雹作

业效果进行模拟定量检验,结果表明,防雹作业可减少降雹27%。

参考文献:

- [1] 黄美元,徐华英,周玲.中国人工防雹四十年[J].气候与环境研究,2000,5(3):318-328.
- [2] 陈立祥.甘肃人工防雹效果浅析[J].大气科学,1981,5(2):225-229.
- [3] 山东省地方史志编纂委员会.山东省志·气象志[M].济南:山东人民出版社,1994:272-281.
- [4] 王雨曾,刘新元,赵宗然,等.人工防雹效果差异分析[J].气象,1996,22(12):31-34.
- [5] 王雨曾,郁青.多物理参量检验防雹效果的研究[J].气象,1995,21(10):3-9.
- [6] 洪延超.冰雹形成机制和催化防雹机制研究[J].气象学报,1999,57(1):30-44.
- [7] 李宏宇,胡朝霞,肖辉,等.人工防雹实用催化方法数值研究[J].大气科学,2003,27(2):212-221.
- [8] 康凤琴,张强,渠永兴,等.青藏高原东北侧冰雹微物理过程模拟研究[J].高原气象,2004,23(6):735-742.
- [9] 李金辉,岳治国,李家阳,等.两块冰雹云催化防雹效果分析[J].高原气象,2011,30(1):252-257.
- [10] 李金辉.陇县防雹作业前后雷达回波变化分析[J].陕西气象,2009(6):9-12.
- [11] 刁秀广,朱君鉴,黄秀韶,等.VIL和VIL密度在冰雹云判据中的应用[J].高原气象,2008,27(5):1121-1139.