

山东沾化一次冰雹过程的数值模拟及催化防雷探讨

樊明月 (山东省人工影响天气办公室, 山东济南 250031)

摘要 利用完全弹性三维冰雹云模式, 模拟研究了山东沾化 2008 年 6 月 25 日的一次冰雹过程, 分析该地区冰雹形成的物理机制, 在此基础上对雹云进行催化试验并研究催化防雷机制。结果表明, 冰雹主要是以冻滴为核心增长的, 催化使冻滴浓度增加, 粒子质量减小, 向雹转化的比例降低, 致使冰雹的质量和浓度减小, 从而达到防雷目的。

关键词 冰雹; 数值模拟; 催化防雷; 山东

中图分类号 S161 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)27-09445-03

Numerical Study on Mechanism of Hail Formation and Hail Suppression with Seeding in Shandong Province

FAN Ming-yue (Weather Modification Office of Shandong Province, Jinan, Shandong 250031)

Abstract A three-dimensional hailstorm numerical model with fully elastic primitive equations is used to simulate a hail cloud occurred in Zhanhua area, Shandong Province on June 25, 2008. The mechanism of hail formation and hail suppression of this cumulus was analyzed. The results showed that most embryos of hail are frozen drops. The increasing of frozen drops concentration and decreasing of its average mass by seeding AgI caused the proportion of conversion from frozen drops into hail descend greatly and all these led the mass and concentration of hailstone to decrease to our purpose of hail suppression.

Key words Hail; Numerical simulation; Hail suppression by seeding; Shandong Province

冰雹是中小尺度强对流云的产物, 作为一种短时强烈灾害性天气, 其发生、发展和影响过程只有数小时甚至几十分钟, 然而冰雹以及与之相伴随的大风、雷暴等剧烈天气过程常常给人类活动造成很大灾害。冰雹是世界范围的气象灾害之一, 也是我国农业生产的主要气象灾害之一。在我国北方地区, 冰雹灾害频繁, 突然的冰雹袭击常给农作物带来毁灭性损失, 尤其是维持时间较长的超级单体风暴所造成的灾害更为严重。观测表明, 冰雹具有明显的区域特征, 冰雹云的结构和运动是相当复杂的, 很多现象都具有三维结构特征, 如超级单体的三维气流结构等^[1]。因此, 利用三维云模式模拟冰雹过程, 详细了解冰雹云的宏观和微观结构特征以及冰雹形成的微物理过程对于较早识别冰雹云进而进行催化防雷有很重要的意义。人工防雷中, 催化技术是影响防雷效果的关键, 而与催化技术研究直接有关的是冰雹形成的物理机制和催化防雷机制。笔者利用中国科学院大气物理研究所研制发展的三维冰雹云模式^[2-5]研究山东沾化 2008 年

6 月 25 日的一次冰雹过程, 分析该地区冰雹形成的物理机制, 并在此基础上对雹云进行催化试验并研究催化防雷机制。

1 个例实况分析

2008 年 6 月 25 日 08:00~20:00, 山东东部沿海有一长而稳定的长波槽, 山东处于槽后西北气流, 蒙古冷涡较偏北偏西, 西北气流中有小股的冷空气扩散下来影响山东。根据 25 日 20:00 实时探空(图 1)可知, 对流层中层有明显的垂直风切变, 高层干冷低层暖湿, 大气层结很不稳定, 地面温度高, 这种天气形势有利于强对流的发生。根据雷达资料(图 2)分析, 25 日 17:30 滨州、东营北部有超级单体生成, 其综合反射率回波强度达 70 dBz, 回波顶最大高度达 17 km 以上, 云中最大上升速度达 28.3 m/s。滨州市沾化县与东营市利津县和河口区出现雷雨, 并伴有较强冰雹。沾化县滨海乡遭受严重雹灾, 降雹自北向南持续时间长达 45 min, 冰雹最大直径达 5 cm, 个别地段冰雹厚度达 5 cm。

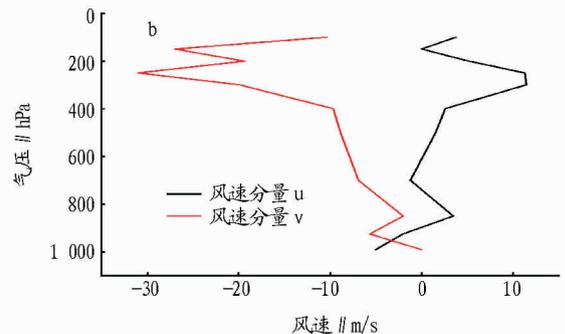
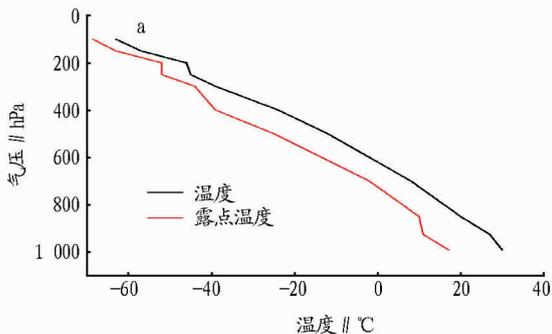


图 1 2008 年 6 月 25 日 20:00 温湿廓线(a)和风廓线(b)

2 数值模拟

为了研究这次降雹形成的主要微物理过程及 AgI 催化

对防雷的效果, 在此利用完全弹性三维强对流云模式对这次过程进行了数值模拟, 模拟云的回波顶高、最大回波强度及模拟云中最大上升速度极值(图 3)与雷达探测值较一致, 说明此模式对这次过程的模拟效果较好。

3 冰雹形成机制分析

冰雹最初的形成主要由 2 个过程决定, 霰和冻滴增长达

基金项目 山东省气象局课题(2013sdqx19)。

作者简介 樊明月(1979-), 男, 山东聊城人, 工程师, 硕士, 从事人工影响天气及数值模拟研究。

收稿日期 2014-08-00

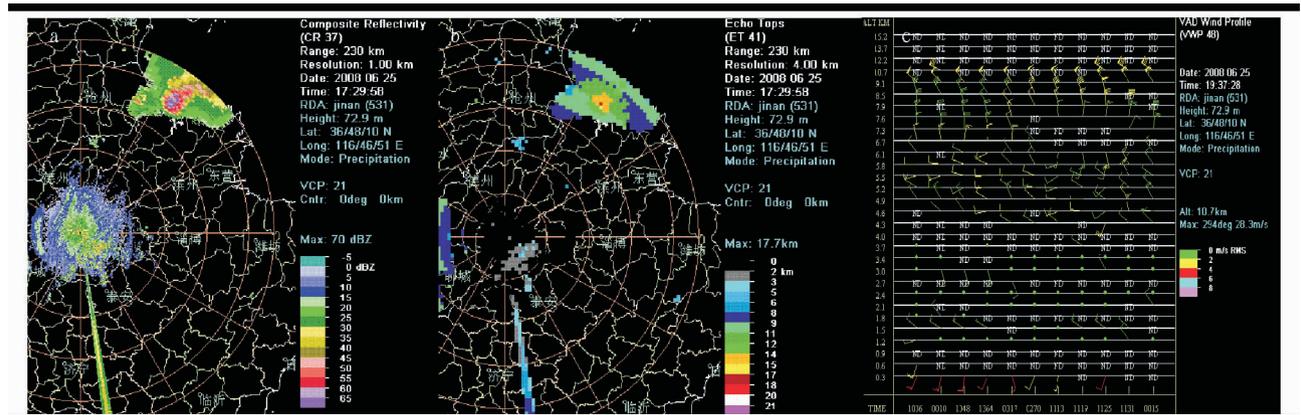


图2 2008年6月25日17:29:58雷达观测回波强度(a)、回波顶高(b)以及19:37:28雷达反演风廓线(c)

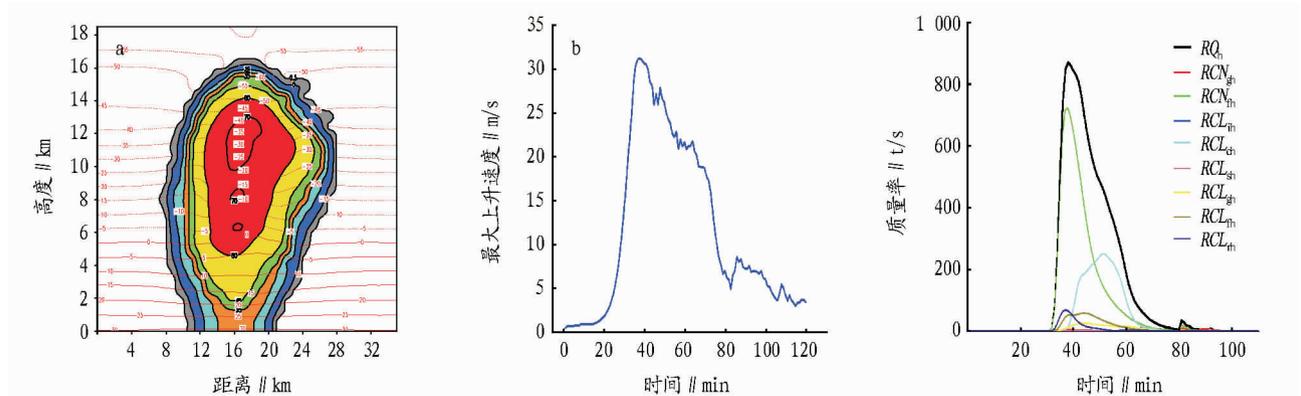


图3 模拟的雷达回波高度、强度(a)以及最大上升速度(b)

图4 雹总量及源项变化率的时间变化

到一定尺度后向雹转化。从冰雹源项中各物理过程总量(表1)可以看出,35~70 min是冰雹质量源项总量增加速度最快时段,从18.0 kt增加至897.7 kt,这从图4可以看出此时冰雹质量源项总量变化率 RQ_h 处于峰值区。在这一时段内,冻滴转化量占冰雹质量源项总量的60%以上,这比霰向雹的转

化大得多,说明冻滴向雹的转化对雹质量的贡献比霰转化的贡献大,冰雹主要由冻滴转化而来。这块云中冰雹增长量约占总量的40%左右,增长方式主要是碰并过冷水,其增长量占冰雹碰并所有各类粒子增长量之和50%左右。

冰雹胚胎的形成及其增长是研究冰雹形成机制的重要

表1 冰雹源项中各物理过程时空积分总质量

T	TQ_h	TCN_{gh}	TCN_{fh}	TCL_{fh}	TCL_{ch}	TCL_{sh}	TCL_{gh}	TCL_{fh}	TCL_{th}
35	18.0	0.2	15.9	0	0	0	0	0	1.8
50	682.8	3.9	471.7	0.4	93.4	0.2	16.1	45.9	51.2
70	897.7	9.6	547.9	0.6	188.1	0.5	31.7	62.5	56.8

注:T为时间(min); TQ_h 为冰雹时空积分总量, TCN_{gh} 、 TCN_{fh} 分别为霰、冻滴转化成雹积分总量, TCL_{fh} 、 TCL_{ch} 、 TCL_{sh} 、 TCL_{gh} 、 TCL_{fh} 、 TCL_{th} 分别为冰雹碰并冰晶、过冷云水、雪、霰、冻滴及雨水分总量,各积分总量的单位为kt。

表2 冰晶、雪源项中各物理过程时空积分总质量

T	冰晶					雪				
	TQ_i	TNU_{vi}/N_n	TP_{ci}/N_p	TCL_{ci}	TVD_{vi}	TQ_s	TCL_{cs}	TCL_{is}	TVD_{vs}	TCN_{is}
35	0.8	0.3/17.5	0/13.7	0	0.5	0	0	0	0	0
50	486.8	13.4/19.4	0/15.3	0.2	473.2	98.8	0.5	28.6	12.1	57.5
70	2 334.8	424.0/21.0	0/15.7	1.7	1 909.0	612.3	69.0	292.0	88.9	162.4

注:T为时间(min); TQ_i 为冰晶时空积分总量, TNU_{vi} 、 TP_{ci} 分别为水汽核化、繁生成冰晶积分总量, TCL_{ci} 、 TVD_{vi} 分别为冰晶碰并过冷云水、水汽凝华成冰晶的积分总量, TQ_s 、 TCL_{cs} 、 TCL_{is} 分别为雪碰并过冷云水、冰晶积分总量, TVD_{vs} 为水汽凝华成雪的积分总量, TCN_{is} 为冰晶转化成雹的积分总量; N_n 、 N_p 分别为水汽核化、繁生成冰晶积分总个数(10^x 个),其中x为表中“/”后的数字。

问题,亦是人工防雹的关键问题,雹胚主要有过冷水滴冻结形成的冻滴及冰晶雪转化形成的霰。水汽核化和繁生产生冰晶,但核化产生的冰晶浓度比繁生产生的冰晶浓度大4~5个量级;冰晶形成之后,主要通过凝华增长(表2)。冰晶自

动转化是雪的主要来源,碰并过冷云水、冰晶以及水汽凝华是雪的主要增长方式(表2)。随后冰晶和雪向雹转化,雨水核化及过冷小雨滴冻结同样产生霰,霰的主要增长方式有碰并过冷云水、雨水和冰晶以及水汽凝华(表3)。冻滴由与冰

晶接触的过冷雨水滴冻结和雨滴核化形成,其增长以碰并雨水为主(表4)。由于地面出现降雹前,霰冻滴数量相差不大,霰雹转化比例比冻滴向雹转化的比例低得多,因此冰雹

的胚胎以冻滴为主。霰、冻滴转化的质量占雹总量的60%以上(表5),冰雹的增长以碰并过冷云水为主。因此适量的冰晶、雪和丰富的过冷水水的存在,尤其是冰雹云发展初期过冷

表3 霰源项中各物理过程时空积分总质量

T	TQ_g	TCN_{ig}	TCN_{sg}	TCL_{ig}	TCL_{cg}	TCL_{rg}	TVD_{vg}	TNU_{rg}	TCL_{rig}
35	35.7	0	0	0	2.0	11.3	0.4	0	0
50	283.4	0	0	18.4	32.8	85.5	59.3	87.3	0.2
70	792.0	0	3.9	101.8	190.2	144.7	215.4	135.6	0.5

注: T 为时间(min); TQ_g 为霰积分总量; TCN_{ig} 、 TCN_{sg} 分别为冰晶、雪转化成霰积分总量; TCL_{ig} 、 TCL_{cg} 、 TCL_{rg} 分别为霰碰并冰晶、过冷云水、雨水积分总量; TVD_{vg} 为过冷区水汽凝结成霰积分总量; TNU_{rg} 为雨水核化形成霰的积分总量; TCL_{rig} 为过冷雨水与冰晶冻结成霰积分总量。

表4 冻滴源项中各物理过程时空积分总质量

T	TQ_f	TCL_{if}	TCL_{cf}	TCL_{df}	TCL_{df}	TNU_{df}	TVD_{df}
35	274.1	0	5.1	255.9	0.2	10.0	3.0
50	1 258.9	3.9	120.4	1 012.7	0.6	34.5	86.6
70	1 444.0	7.8	195.5	1 083.5	0.9	36.3	120.0

注: T 为时间(min); TQ_f 为冻滴时空积分总量; TCL_{if} 、 TCL_{cf} 、 TCL_{df} 分别为冻滴碰并冰晶、过冷云水、雨水积分总量; TCL_{df} 为过冷区与冰晶雪接触雨滴本身冻结积分总量; TNU_{df} 为雨水核化形成冻滴的积分总量; TVD_{df} 为过冷区水汽凝结成冻滴积分总量。

雨水的存在对冰雹的形成和增长极为有利。

4 冰雹云催化防雷的物理机制

在数值模拟的基础上,利用 AgI 对雹云进行了催化试验,并探讨了催化防雷机制。从催化结果(表5)看,与非催化云相比,催化云地面降水量、降雨量及降雹量均有所减小,降雨量占总降水量的比例增加,降雹量占总量的比例减小了10%。

从地面降雹前2 min即第45 min时主要微物理过程产生的总量(表6)可以看出,由于催化冰晶和雪总质量分别增加了45%和187%,其数量也有所增加,特别是催化的直接

表5 催化前后地面参量对比

项目	SP (kt)	SP_r (kt)	SP_h (kt)	P_{ig}	P_{sg}	P_{gh}	P_{rh}
催化	895.1	648.7/72%	188.7/21%	7.94×10^{-12}	7.94×10^{-5}	7.94×10^{-5}	1.58×10^{-4}
未催化	1 567.7	1 009.9/64%	489.5/32%	0	2.51×10^{-5}	6.31×10^{-6}	3.98×10^{-3}

注: SP 、 SP_r 、 SP_h 分别为地面降水、降雨及降雹总量,分母上为地面降雨量、降雹量占总降水量的比例; $P_{ig} = TNCN_{ig}/TN_i$ 、 $P_{sg} = TNCN_{sg}/TN_s$ 分别为45 min冰晶、雪向霰的转化比例; $P_{gh} = TNCN_{gh}/TN_g$ 、 $P_{rh} = TNCN_{rh}/TN_r$ 分别为45 min霰及冻滴向冰雹的转化比例。

表6 地面降雹前2 min催化对雹云主要物理过程总量的影响

冰晶	非催化值	催化值	雪	非催化值	催化值	霰	非催化值	催化值	冻滴	非催化值	催化值	冰雹	非催化值	催化值
TQ_i	200.1	289.9	TQ_s	22.5	64.6	TQ_g	191.6	639.7	TQ_f	1 176.3	549.2	TQ_h	532.9	261.2
TNU_{vi}	6.5	6.8	TCL_{cs}	0.1	0.8	TCL_{ig}	2.8	37.6	TCL_{if}	2.4	13.6	TCN_{gh}	3.2	28.2
TCL_{ci}	0	0.2	TCL_{is}	4.0	8.8	TCL_{cg}	22.3	54.7	TCL_{cf}	85.6	28.1	TCN_{rh}	401.8	158.9
TVD_{vi}	193.6	282.9	TVD_{vs}	2.5	15.1	TCL_{rg}	82.1	299.4	TCL_{df}	987.1	445.4	TCL_{ih}	0.2	0.3
TN_i	18.9	18.9	TCN_{is}	15.9	39.9	TVD_{vg}	28.6	128.7	TCL_{df}	0.6	1.6	TCL_{ch}	42.6	6.5
$TNNU_{vi}$	18.9	18.9	TCL_{ii}	0	0	TNU_{rg}	55.6	118.6	TNU_{rf}	34.0	5.5	TCL_{sh}	0	0.4
TNP_{ci}	15.2	15.3	TN_s	16.0	16.4	TN_g	15.8	16.5	TVD_{df}	66.7	51.4	TCL_{rh}	9.4	21.2
TN_{ssi}	0	16.5	$TNCN_{is}$	16.0	16.4	$TNCN_{ig}$	0	7.8	TNU_{rsf}	0	3.5	TCL_{fh}	30.6	14.3
			$TNCL_{ris}$	11.2	12.6	$TNCN_{sg}$	11.4	12.3	TN_f	15.0	16.0	TCL_{th}	45.0	31.4
						$TNNU_{rg}$	15.8	16.2	$TNCL_{if}$	14.4	15.8	TN_h	12.6	12.2
						$TNCL_{rig}$	14.4	15.4	$TNNU_{rf}$	14.9	15.3	$TNCN_{gh}$	10.6	11.4
									$TNNU_{rsf}$	0	13.2	$TNCN_{rh}$	12.6	12.2

注: TQ_h :冰雹时空积分总量, TNU_{vi} 、 TP_{ci} :水汽核化、繁生形成冰晶积分总量, TCL_{ci} 、 TVD_{vi} :冰晶碰并过冷云水、水汽凝结成冰晶的积分总量, TQ_s :雪时空积分总量, TCL_{cs} 、 TCL_{is} :雪碰并过冷云水、冰晶积分总量, TVD_{vs} :水汽凝结成雪的积分总量, TCN_{is} :冰晶转化成雹的积分总量, TQ_g :霰积分总量, TCN_{ig} 、 TCN_{sg} :冰晶、雪转化成霰积分总量, TCL_{ig} 、 TCL_{cg} 、 TCL_{rg} :霰碰并冰晶、过冷云水、雨水积分总量, TVD_{vg} :过冷区水汽凝结成霰积分总量, TNU_{rg} :雨水核化形成霰的积分总量, TCL_{rig} :过冷雨水与冰晶冻结成霰积分总量, TQ_f :冻滴时空积分总量, TCL_{if} 、 TCL_{cf} 、 TCL_{df} :冻滴碰并冰晶、过冷云水、雨水积分总量, TCL_{df} :过冷区与冰晶雪接触雨滴本身冻结积分总量, TNU_{df} :雨水核化形成冻滴的积分总量, TVD_{df} :过冷区水汽凝结成冻滴积分总量, TQ_h :冰雹时空积分总量, TCN_{gh} 、 TCN_{rh} :霰、冻滴转化成雹积分总量, TCL_{ih} 、 TCL_{ch} 、 TCL_{sh} 、 TCL_{gh} 、 TCL_{rh} 、 TCL_{th} :冰雹碰并冰晶、过冷云水、雪、霰、冻滴及雨水积分总量,这些积分总量的单位均为 kt。 TN_i 、 $TNNU_{vi}$ 、 TNP_{ci} 、 TN_{ssi} :冰晶总数、水汽核化、繁生及催化冰晶数时空积分总个数, TN_s 、 $TNCN_{is}$ 、 $TNCL_{ris}$:雪总数、冰晶转化及雨水与冰晶接触成雪时空积分总个数, TN_g 、 $TNCN_{ig}$ 、 $TNCN_{sg}$ 、 $TNNU_{rg}$ 、 $TNCL_{rig}$:霰总数、冰晶、雪转化、雨水核化及雨水与冰晶接触成霰时空积分总个数, TN_f 、 $TNNU_{rf}$ 、 $TNCL_{if}$ 、 $TNNU_{rsf}$:冻滴总数、雨水核化及雨水与冰晶雪接触成霰时空积分总个数, TN_h 、 $TNCN_{gh}$ 、 $TNCN_{rh}$:冰雹总数及霰、冻滴转化成雹时空积分总个数,这些数量的单位均为 10^6 个,其中 x 为表中数字。

效果使冰晶增加了 $10^{16.5}$ 个,冰晶和雪向霰的转化比例分别由原来0和 2.51×10^{-5} 增加至 7.94×10^{-12} 和 7.94×10^{-5} (表5),催化使霰的总质量增加明显,约234%,使其数量增加

298%;霰向雹转化的比例由 6.31×10^{-6} 增加至 7.94×10^{-5} (表5)。与催化对云内冰晶、雪及霰的影响不同,催化后冻(下转第9451页)

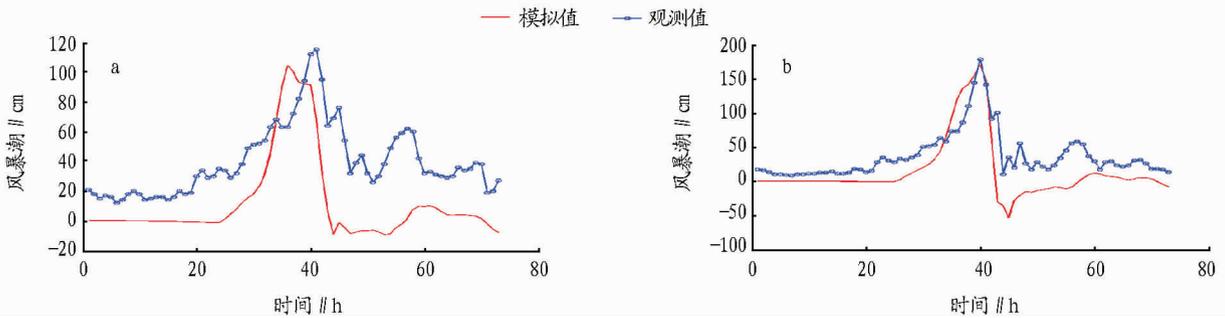


图8 日照站(a)和连云港站(b)过程增水时程曲线

表3 显著台风风暴增水过程预测值与实测值的比较

站名	实测最大增水		预测最大增水		绝对误差/cm	相对误差/%
	数值/cm	时间	数值/cm	时间		
日照	115	8月3日00:00	103	8月2日19:00	12	10.4
连云港	178	8月2日23:00	174	8月2日23:00	4	2.3

时间和强度与实况值较接近。

4 小结和讨论

(1) 1210 号台风“达维”正面登陆江苏沿海,使江苏省遭受较大的经济损失,但由于台风冷空气降水和台风降水的叠加效应以及各种次生灾害的影响,1210 号台风对辽宁等北方省份的影响大于对江苏的影响。

(2) 台风过程最大增水对应的时间不一定是天文高潮,所以作风暴潮预报时不能仅仅简单地将预报的过程最大增水叠加到天文高潮位上,而应该结合预报台风登陆的时间和该时刻的天文潮大小做科学研判。

(3) 台风风暴潮数值预报系统对 1210 号台风“达维”的风暴潮过程的预报情况与观测结果比较吻合,可见该台风风

暴潮数值预报系统对此类强度较强且登陆江苏沿海的台风过程的增水过程描述准确,对江苏沿海台风风暴潮的预报预警有非常重要的参考价值,为江苏的防灾减灾提供了重要的技术支持和保障。

参考文献

- [1] 沙文珏. 风暴潮、浪数值预报[M]. 北京:海洋出版社,2004.
- [2] 王欣睿,孙波涛,陈强,等. 0606 号台风“派比安”风暴潮特征分析与总结[J]. 海洋预报,2008,25(2):99-105.
- [3] 2012 中国海洋灾害公报[R]. 北京:国家海洋局,2012.
- [4] BLAIN C A, WESTERINK J J. The influence of domain size on the response characteristics of a hurricane storm surge model[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(9):18467-18479.
- [5] BLAIN C A, WESTERINK J J, LUETTICH J R. Grid convergence studies for the prediction of hurricane storm surge[J]. International Journal For Numerical Methods In Fluids, 1998, 26:369-401.
- [6] BUNYA S, WESTERINK J J, YOSHIMURA S. Discontinuous boundary implementation for the shallow water equations[J]. Int J Number - Meth Fluids, 2005, 47:1451-1468.
- [7] 傅赐福,董剑希,吴少华,等. 渤海典型温带风暴潮数值模拟及改进实验[J]. 海洋预报,2011,28(5):1-8.
- [8] HOLLAND G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes [J]. Mon Wea Rev, 1980, 108:421-427.

(上接第 9447 页)

滴的总质量由 11 76.3 kt 减小至 549.2 kt,减少约 53%,冻滴质量减小主要原因是冻滴碰并过冷水云、雨水及其他粒子的增长量明显减小,特别是碰并雨水产生的冻滴约减小 541.7 kt。催化后冻滴个数增加了 9.0×10^{14} 个,约为非催化云的 2 倍。催化云中冻滴数量增加的主要原因是由于冰晶和雪浓度的大量增加,使尺度较小的过冷雨滴发生接触冻结,活化 AgI 粒子直接与雨滴的接触冻滴。催化云中冻滴总质量减小,冻滴的平均质量和直径的减小,致使霰向雹转化的比例明显降低(表 5)。而 60% 以上冰雹均来自冻滴的转化过程,因此冰雹的总质量和数量均有明显减小,另外还可以看出,冰雹碰并过冷水云的减小也是冰雹总质量减小的主要原因之一。

从以上分析可知,催化使云中冰晶和雪的质量及数量明显增加,冰晶、雪向霰的转化比例增大,转化形成霰的数量和质量均有所增加;霰雹转化比例增加,实际转化成冰雹的质量和数量均有所增加,但由于总霰量及转化比例小,霰量的增加非常有限;冻滴向霰的转化是冰雹生成及质量增加的主要过程,催化后冻滴向霰的转化比例减小致使霰总量的大幅度减小。

5 总结

利用三维冰雹云模式对山东的一次冰雹过程进行了数值模拟,分析了成雹机制并研究了催化防雹。结果表明,冻滴和霰均可以转化成冰雹,地面出现降雹前,霰冻滴数量相差不多,但冻滴向冰雹转化的比例比霰大得多,冰雹主要以冻滴为胚胎。催化使冰晶和雪的质量数量均有所增加,向霰转化的比例增加,霰的质量数量有所增加,霰向冰雹转化的比例有所增加,但由于霰总量及转化比例的有限,对冰雹总形成影响不大,冰雹主要以冻滴为核心增长,催化使冻滴质量减小,数量增加,从而向冰雹转化的比例明显降低,因而使冰雹数量和质量上均减小,催化达到了防雹效果。

参考文献

- [1] 巢纪平,周晓平. 积云动力学[M]. 北京:科学出版社,1964.
- [2] 孔凡轴. 冰雹云三维数值模式模拟研究[D]. 北京:中国科学院大气物理研究所,1991:1-155.
- [3] 洪延超. 三维冰雹云催化数值模式[J]. 气象学报,1998,56(6):641-651.
- [4] 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.
- [5] 肖辉,王孝波,周非非,等. 强降水云物理过程的三维数值模拟研究[J]. 大气科学,2004,28(3):385-404.