

# 湖南特大冰冻灾害的云物理特征 与人工影响技术探讨

樊志超 高继林

(湖南省人工影响天气领导小组办公室,长沙 410007)

**提 要:**我国南方2008年初的持续低温雨雪冰冻灾害造成了重大社会影响,湖南等省损失巨大。利用常规气象资料分析天气成因,利用长沙高空气象探测站的L波段探空数据和地面气象观测资料分析湖南雨淞天气的大气层结特征,利用人工增雨云系模式模拟其微物理过程。结果表明:当锋面逆温具有较厚的融化层(或温度较高)和较薄的冷却层(或气温不太低)构成“雨淞层结”时,就可形成雨淞天气;混合云降水是这次冻雨的主要降水机制,“三层模型”和“雨淞层结”可以完整和全面地解释冻雨形成的机制与过程。在此基础上根据冰晶效应和爆炸效应进一步对人工防冻雨的可行性进行了技术探讨。

**关键词:**冻雨 大气层结 微物理过程 人工影响天气

## The Cloud Physical Characteristics of Extreme Freeze Catastrophic Weather in Hunan Province and the Possibility of Suppression

Fan Zhichao Gao Jilin

(Hunan Weather Modification Office, Changsha 410007)

**Abstract:** The unprecedented disasters of low temperature, persistent rain, snow and ice storms occurring in early 2008 in South China have exerted a significant social impact, which causes great losses in Hunan and other provinces. The weather reason was analyzed by using conventional meteorological data, the atmospheric stratification of freezing rain weather in Hunan was analyzed by using the L band radiosonde data and ground meteorological data at Changsha Radiosonde Station, and the microphysical processes were simulated by using weather modification model. The analysis indicated that the freezing rain weather would form when the frontal inversion having a thicker melting layer (or higher temperature) and a thinner cooling layer (or not too lower temperature) constitutes a freezing rain stratification.

Mixing cloud precipitation is the main precipitation mechanism of the freezing rain, the three-layer model and the freezing rain stratification could explain the entire mechanism and process of the freezing rain formation completely and comprehensively. Further exploring the possibility of freezing rain suppression was carried out based on the ice crystal effect and explosion effect.

**Key Words:** freezing rain atmospheric stratification microphysical processes weather modification

## 引 言

2008年1月10日至2月2日,一场持续低温雨雪冰冻天气袭击了我国南方,这场极端灾害性天气属五十年一遇,湘鄂两省平均气温连续低于 $1^{\circ}\text{C}$ 的日数为百年一遇,是1954年以来低温持续时间最长、影响程度最严重的一次,湖南因灾直接经济损失680多亿元。关于这场灾害的主要天气特征与成因,许多专家已进行了初步分析和研讨<sup>[1-7]</sup>。郭学良提出了人工消除冻雨的可能,但国内还没有进行过这方面实验。国际上有一些通过在过冷云水区播撒来减少飞机积冰事件或减轻道路和高速公路积冰可能性的设想,但如何减少灾害以及在这方面开展工作仍缺乏有物理基础的概念模型<sup>[8]</sup>。本文利用冰冻期间长沙探空站的地面观测和L波段常规探空资料,结合中尺度云模式的数值模拟,对形成雨淞天气过程的天气形势和大气层结特征进行分析,初步建立雨淞形成的云物理概念模型,并进一步探讨人工影响雨淞天气的可行性。

## 1 天气形势特点

1月13日至2月5日,湖南全省平均雨(雪)量29.9mm,平均气温 $-0.6^{\circ}\text{C}$ ,平均冰冻日数11.7天,65个县日平均气温低于 $0^{\circ}\text{C}$ 的严寒日数在15天以上,湘中大部及湘西南局部大于15天,有48个县区的连续冰冻日数打破或持平观测纪录,结冰厚度大多

在20mm以上,冰冻直径超过40mm的有8个县市,超过50mm的有3个县市。

1月13日至2月2日,中高纬阻塞高压维持,副高偏强偏北,孟加拉湾为稳定低槽,地面冷空气强度强,路径偏东、偏北,这是主要的大气环流背景。在500hPa图上,中高纬经向环流长时间持续,乌拉尔山以东巴尔喀什湖附近阻塞高压稳定,并不断有小槽分裂南下,带动地面冷空气补充南下,副高强度持续偏强偏北,孟加拉湾低槽少动,使湖南长时间处于槽前西南气流之中。700hPa图上,西南急流始终维持,一方面有利暖湿水汽输送,另一方面有利于逆温层的形成,促使雨雪、冰冻天气长时间维持。850hPa图上,切变线在湖南省境内来回摆动,切变线北侧为偏北风,主要以降雪为主,冰冻发展较慢;南侧以雨夹雪天气为主,冻冰发展迅速。地面冷空气主体偏北、偏东,不断有冷空气经洞庭湖区补充南下,造成湖南长时间低温雨雪冰冻天气。

## 2 大气层结特征与雨淞形成过程

### 2.1 大气层结特征

利用长沙高空气象探测站(57679,  $28^{\circ}12'N$ ,  $113^{\circ}05'E$ , 海拔44.9m)的GFE(L)1型雷达探空数据结合地面气象观测记录对雨淞(冻雨)层结进行分析,1月11日至2月3日的24天中有18天出现了雨淞(含雨夹雪、冰粒)、3天仅下雨未下冻雨,18天冻雨的层结曲线分别有7次(08时)和3次(20时)的高低空气温都在 $0^{\circ}\text{C}$ 以下。将其余的11次(08时)和

13次(20时)雨淞层结与降雨层结进行配对统计分析,结果如表1、表2所示。08时(20时)又可分为5次(6次)雨淞(含雨夹雪、冰粒)和

6次(5次)纯雨淞(不带固态降水物)天气,配对统计分析结果如表3、表4。

表1 雨淞(含雨夹雪、冰粒)与降雨天气的融化层探空数据

天气现象	探空时次	融化层							
		最高温度区间 /°C	均值 /°C	逆温上界高度区间 /m	均值 /m	逆温下界高度区间 /m	均值 /m	厚度区间 /m	均值 /m
雨淞(雨夹雪冰粒)	08	6.7~0.7	3.4	3748~2859	3153.7	2200~1604	1975.5	1912~799	1178.3
	20	8.2~0.9	3.4	4422~2818	3193.9	2418~1782	2066.2	2386~479	1127.7
雨	08	7.5~1.6	4.7	3169~2769	2974	2121~1209	1726	1960~863	1248
	20	6.8~3.9	5.4	2944~3087	3028.3	1850~1738	1781	1349~1189	1247.3

表2 雨淞(含雨夹雪、冰粒)与降雨天气的冷却层探空数据

天气现象	探空时次	冷却层							
		最低温度区间 /°C	均值 /°C	冷却上界高度区间 /m	均值 /m	冷却下界高度区间 /m	均值 /m	厚度区间 /m	均值 /m
雨淞(雨夹雪冰粒)	08	-8.7~-5.2	-6.9	2200~1604	1975.5	45	45	2155~1559	1930.5
	20	-8.9~-5.9	-7.1	2418~1782	2066.2	52~45	46.6	2373~1737	2019.6
雨	08	-5.6~-2.5	-4.4	2121~1209	1726	438~95	210.3	2026~771	1515.7
	20	-4.8~-2.6	-4.0	1850~1738	1781	384~108	222.7	1674~1371	1558.3

从表1和表2可以看出,雨淞(含雨夹雪、冰粒)天气相对降雨天气发生时的大气层结曲线有明显不同:融化层平均温度偏低,平均上(下)界高度均偏高,平均厚度偏薄。其中08时(20时)分别偏低1.3°C(2.0°C),偏高179.7m(165.6m),偏高249.5m(285.2m),偏薄69.7m(119.6m)。冷却层平均温度偏低,平

均上界高度偏高,平均下界高度偏低,平均厚度偏厚。其中08时(20时)分别偏低2.5°C(3.1°C),偏高249.5m(285.2m),偏低165.3m(176.1m),偏厚414.8m(461.3m)。雨淞(含雨夹雪、冰粒)的冷却层厚度不管是相对其融化层还是相对降雨的冷却层均明显偏厚。

表3 雨淞(含雨夹雪、冰粒)与纯雨淞天气的融化层探空数据

天气现象	探空时次	融化层							
		最高温度区间 /°C	均值 /°C	逆温上界高度区间 /m	均值 /m	逆温下界高度区间 /m	均值 /m	厚度区间 /m	均值 /m
雨淞(雨夹雪冰粒)	08	5.7~0.7	3.7	3748~2948	3332.6	2200~1836	2072.4	1912~799	1260.2
	20	8.2~0.9	4.1	4422~2862	3281.9	2341~1782	1989	2386~521	1292.9
雨淞	08	6.7~1.0	3.1	3223~2859	3004.7	2059~1604	1894.7	1495~807	1110
	20	4.5~1.2	2.3	3684~2818	3053.2	2418~1901	2189.8	1460~479	863.4

表4 雨淞(含雨夹雪、冰粒)与纯雨淞天气的冷却层探空数据

天气现象	探空时次	冷却层							
		最低温度区间 /°C	均值 /°C	冷却上界高度区间 /m	均值 /m	冷却下界高度区间 /m	均值 /m	厚度区间 /m	均值 /m
雨淞(雨夹雪冰粒)	08	-8.7~-6.7	-7.8	2200~1836	2072.4	45	45	2155~1791	2027.4
	20	-8.9~-5.9	-7.3	2341~1782	1989	52~45	45.9	2296~1737	1943.1
雨淞	08	-7.4~-5.2	-6.2	2059~1604	1894.7	45	45	2014~1559	1849.7
	20	-8.2~-6.0	-6.8	2418~1901	2189.8	52~45	47.8	2373~1856	2142

从表 3 和表 4 可以看出,雨淞(含雨夹雪、冰粒)天气相对纯雨淞天气发生时的层结曲线也有差别:融化层平均温度偏高,平均厚度偏厚。其中 08 时(20 时)分别偏高  $0.6^{\circ}\text{C}$  ( $1.8^{\circ}\text{C}$ ),偏厚  $150.2\text{m}$  ( $429.5\text{m}$ )。冷却层平均温度偏低。其中 08 时(20 时)分别偏低  $1.6^{\circ}\text{C}$  ( $0.5^{\circ}\text{C}$ )。两种天气的冷却层厚度均明显大于融化层厚度。

需要说明的是上述层结分析不包括 7 次(08 时)和 3 次(20 时)高低空气温都在  $0^{\circ}\text{C}$  以下的情况,这种曲线在形状上虽然表现出逆温特征,但逆温层温度都在  $0^{\circ}\text{C}$  以下,逆温层下部最低温度在  $-6.5\sim-8.6^{\circ}\text{C}$  之间,天气现象主要是冻雨、雪、雨夹雪,有 2 次出现了冰粒。

## 2.2 雨淞形成过程

分析表明雨淞(含雨夹雪、冰粒)、纯雨淞、雨天气发生时的层结曲线有明显不同,如图 1(见彩页)所示。三种天气区上空都有明显的锋区逆温存在,其区别主要在  $600\text{hPa}$  以下。将温度在  $0^{\circ}\text{C}$  以上的逆温层称为融化层,逆温层下部温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  的气温层称为冷却层,则降雨区的融化层温度高、厚度厚,冷却层较薄、温度不低,高层雪花落经此层必然融化成雨点降落地面;而雨淞(含雨夹雪、冰粒)的逆温层上部的温度一般都在  $0^{\circ}\text{C}$  以上(或高低空气温全在  $0^{\circ}\text{C}$  以下),对高空降落的冰晶、雪花起到一定的融化作用,逆温层下部的冷却层相反对液态水有一定的凝固或冷却作用。在雨夹雪或冰粒发生时,融化层相对较薄,冷却层相对较厚或温度较低,高空雪花、霰降落时仅能部分融化,降至低层又能凝固成冰粒,因而形成雨夹雪或冰粒;在纯雨淞发生时,融化层相对较厚或温度较高,冷却层较薄,气温不太低,对液态降水主要起冷却作用,使高空雪花、霰降落时融化成的雨滴,并保持过冷却的液态水状态抵达地面,这

些  $0^{\circ}\text{C}$  左右或以下的过冷雨滴降落在  $0^{\circ}\text{C}$  左右或以下的地面时能立即粘附在裸露物的外表而不流失,并边降边冷却就形成了雨淞。利用以上分析数据绘制长沙地区雨、雨淞、雨淞(含雨夹雪、冰粒)等天气发生时的大气层结曲线如图 2 所示。

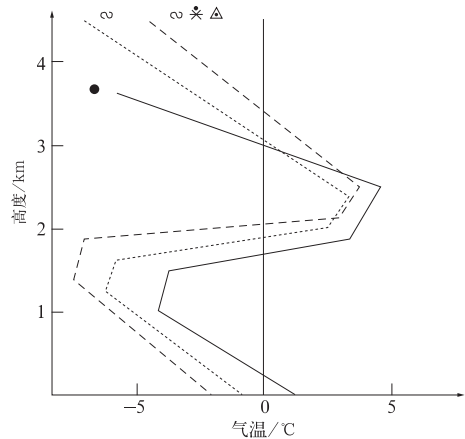


图 2 长沙地区雨(实线)、雨淞(点线)、雨淞(虚线,含雨夹雪、冰粒)等天气发生时的大气层结曲线比较

综合天气形势、大气层结和地面观测记录分析可知,湖南这次特大冰冻灾害主要由 4 次冷空气过程造成:1 月 11 日湖南开始出现降雨,13 日 08 时,强冷空气南下影响江南地区,  $850\text{hPa}$  的  $0^{\circ}\text{C}$  线进入湖南,这导致长沙地区上空冷却层增厚构成雨淞层结,长沙高空站 14:16 开始观测到雨淞(伴雨夹雪、冰粒)一直维持到 17 日上午,之后湖南高空低槽过境,18 至 19 日,地面冷高变性,西南气流向北伸展,融化层增厚构成降雨层结,从 17 日 17:45 开始长沙只降雨未降雨淞,湘中冰冻从 15 日开始发展;20 日 08 时的  $700\text{hPa}$  图上西南暖湿气流增强,切变线在  $31^{\circ}\text{N}$  维持,  $850\text{hPa}$  的切变锋区位于湘中一带,长沙地区上空再度构成雨淞层结,从 01:03 开始出现雨淞(伴雨夹雪)并维持,同时湘中冰冻迅速发展,湘南部分县市出现冰冻;受不断补

充南下的冷空气和增强的西南暖湿气流共同影响,27至29日湖南自北向南出现雨雪加大的天气过程,长沙28日日降雨量达22.5 mm,雨淞(伴雨夹雪、冰粒)天气持续到31日上午,湘南冰冻进一步发展;31日下午低层切变位于湘南,长沙从17:30开始降雨停止,31日晚南支低槽东移影响湖南,中低层切变北抬,省内雨雪强度加大,长沙2月1日05:50观测到雨淞(伴雨夹雪、冰粒)持续到2月2日13:10,而湘中以南地区普降中到大雪,部分地区出现了暴雨,2日下午长沙高空低槽过境,天气转多云。

### 3 云物理结构与概念模型

#### 3.1 云物理结构特征

我国专家采用数值模式探索云宏微物理结构取得了较好结果,如祁连山云系云微物理结构和人工增雨催化个例模拟研究<sup>[9]</sup>,西北地区一次层状云降水云物理结构和云微物理过程的数值模拟研究<sup>[10]</sup>等。为了显示本次降水云系的云物理结构和微物理特征,利用国家气象中心人工增雨云系模式对云微物理场进行了模拟。该模式预报的1月28日08时至29日08时地面总降雨量及落区与

降雨实况相当吻合,如表5。依据卫星红外云图显示的湘东北和长沙地区上空有较宽广的层积混合云(Fn,Asop),使用GrAds显示云模式1月28日08时输出的当日23时沿28.0°N(长沙)垂直方向上云中冰晶、雪、霰和雨水的比含水量分布,分别为0.016 g·kg<sup>-1</sup>、0.1 g·kg<sup>-1</sup>、0.22 g·kg<sup>-1</sup>、0.1 g·kg<sup>-1</sup>,对应最大数浓度分别为20 L<sup>-1</sup>、3.0 L<sup>-1</sup>、1.6 L<sup>-1</sup>、5.5 L<sup>-1</sup>。分析表明,在层积混合云中,各微物理量分层较明显,冰晶处于上层,雪晶处于中上层,霰处于中下层,雨水处于下层,云水主要处于中下层、部分处于下层。结合长沙高空气象探测站2008年1月28日20时的探空资料分析可知,冰晶、雪晶、霰、雨水分别主要分布在200~500 hPa(12138~5661 m)、250~550 hPa(10646~4909 m)、500~700 hPa(5661~3028 m)、600 hPa(4247 m)以下。雨水比含水量的大值区与融化层有很好的对应关系,这说明雨水主要由雪和霰的融化产生,同时在下层进一步通过碰并增长。由图3可见水汽最大比含水量为6.5 g·kg<sup>-1</sup>,在600 hPa以下基本保持在5.5 g·kg<sup>-1</sup>以上;云水最大比含水量0.33 g·kg<sup>-1</sup>,主要分布在中下层450~600 hPa(6446~4247 m),其次分布在下层600~850 hPa(4247~1462 m)。

表5 2008年1月28日08时至29日08时湖南降雨量与长沙探空站天气现象

降雨量与天气现象		长沙 (57679)	衡阳 (57872)	郴州 (57972)	邵阳 (57766)	永州 (57866)	怀化 (57749)
1月29日08—08时 雨量/mm	模式预报	12~16	16~20	0~8	12~16	20~28	20~24
	实况值	20.6	17.2	11.2	18.5	22.1	9.3
长沙探空站地面 气象观测记录	1月28日	天气现象:	~ 20-20	* 20-11 <sup>50</sup>	15 <sup>30</sup> -20	▣ 7 <sup>10</sup> -20 ▣	* 11 <sup>50</sup> -15 <sup>30</sup>
	1月29日	天气现象:	~ 20-20	* 20-6 <sup>30</sup>	△ 20-20 <sup>50</sup> ▣ ▣ =		

#### 3.2 云微物理过程

顾震潮<sup>[11]</sup>认为层状云中冰晶在下降过程中经过三个阶段,并将之称为层状云降水

形成的三层模型。深厚的层状云和积雨云属于混合云降水<sup>[12]</sup>。混合云中的“播种—供给”机制对降水的产生和增大十分有利<sup>[13-14]</sup>。长沙探空站1月28日夜间地面观

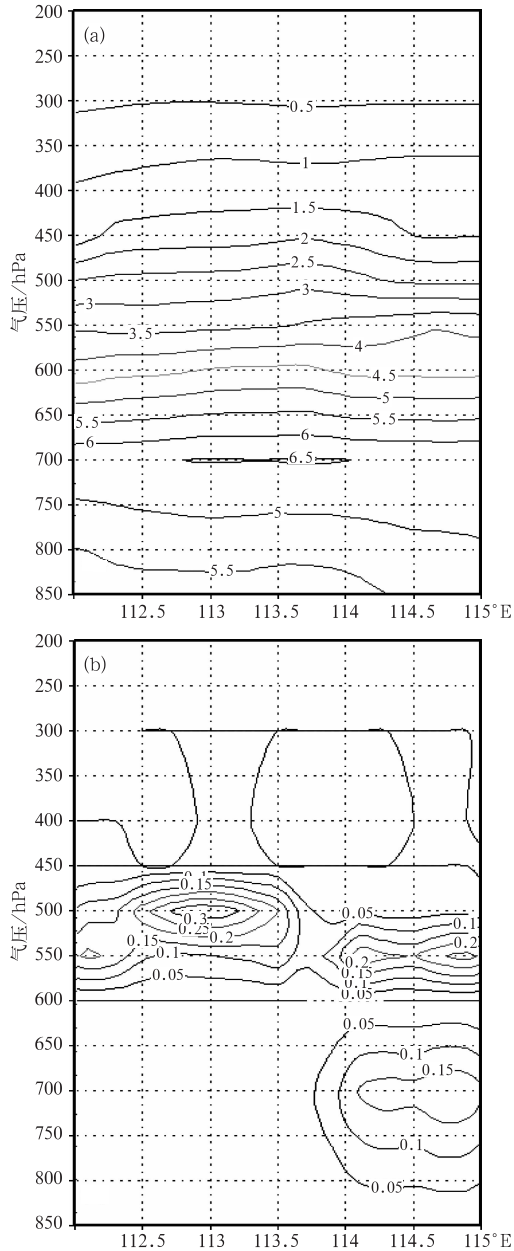


图 3 人工增雨云系模式模拟的 2008 年 1 月 28 日 23 时沿 28.0°N 垂直剖面 (a)水汽比含水量  $q_v$ ; (b)云水比含水量  $q_c$  (单位:  $g \cdot kg^{-1}$ )

测记录到冻雨和雨夹雪,以下结合当日 20 时探空和数值模拟说明其云微物理过程,前述分析表明在孟加拉湾洋面形成的丰沛水汽经水平输送到湖南区域上空的低层,经锋面抬

升绝热膨胀冷却凝结成云滴,系统性层状云(Fn、Asop)发展比较旺盛,云的上部( $-25^{\circ}C$ 以下, 8088~12138m)具有冰晶结构,浓度较高(最大数浓度为  $20L^{-1}$ ),冰晶凝华长大一部分已形成雪晶,同时开始下落,对中层起“播种”冰晶的作用;中层温度在  $0^{\circ}C$  以下( $0^{\circ}C$ 高度, 2920m),冰晶和过冷水滴同时存在,晶种在中层上部( $-15^{\circ}C$ 高度, 6509m)主要通过云内的“冰晶效应”增长,云滴不断蒸发并向冰晶上凝华,当增大至  $100\mu m$  以上后,因该层下部过冷水滴非常丰富会通过淞附迅速增长,冰雪晶增大开始下落,一方面与其他冰晶碰连形成雪花,另一方面同时还收集过冷却水滴形成霰;下层为  $0^{\circ}C$  以上的丰水层,雪花和霰在约 2920m 高度进入厚达 970m 的逆温层( $T_{max} = 4.9^{\circ}C$ ),绝大部分融化成了雨滴,并进一步碰并增长;在约 1950m 高度,雨滴、小部分未全部融化的雪花和霰开始进入冷却层( $T_{min} = -7.4^{\circ}C$ ),雨滴保持过冷却液态水形式抵达地面形成冻雨,未全部融化的雪花和霰经过冷却层又冻结增大形成雨夹雪。在整个冰冻期间,长沙地面降雪主要是颗粒状的霰(冰粒),而少雪花或飘雪,这是因为合适的融化层将雪花基本融化变成了雨滴。

### 3.3 冻雨形成的云物理概念模型

利用云模式与实际探空资料结合得出冻雨形成的云物理概念模型,如图 4 所示。

## 4 人工影响雨淞技术探讨

### 4.1 人工影响雨淞的基本原理

冷云催化主要是通过播撒成冰催化剂使云中产生相当数量的冰晶,通过“Bergeron过程”造成过冷水滴蒸发和冰晶增长而降落<sup>[15]</sup>。在云内增加冰晶的方法有两种,一是在云内引入人工冰核,如碘化银(AgI),二是在

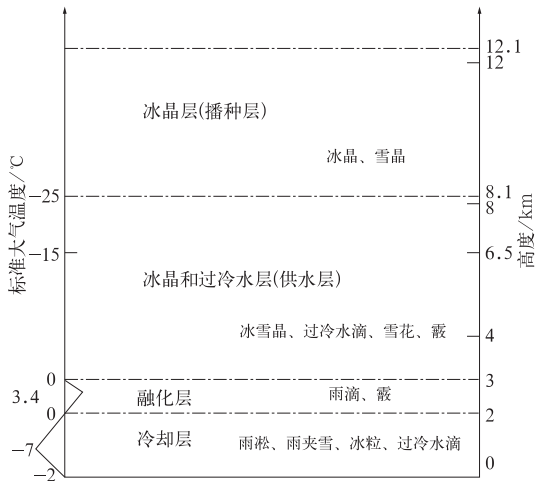


图 4 冻雨形成的四层模型

在云内播撒致冷剂,如干冰、丙烷等。

由第 3 节可知,雨淞发生时在冷却层中存在有大量的水汽和过冷液水,如果能在其中引入冰晶,人工启动“Bergeron 过程”,使过冷云滴和雨滴向冰晶转化,就可以破坏过冷液水到达地面形成雨淞过程中的关键环节,将有可能只降雪(霰、冰粒)而不降冻雨,或者明显减轻冻雨的强度,从而在重点地区形成人工防冻雨的保护区。

湖南这次特大冰冻灾害损失巨大主要是因为持续冻雨造成大范围的电力输电线路覆冰倒塔(杆)、路面冰冻打滑交通中断、通讯供水受阻,由于水、电、路被冻坏进而影响工农业生产和生活而造成的。如果能通过人工影响天气手段将雨淞改变成雪(霰、冰粒)的形式降落地面,则破坏程度将明显减轻,灾害损失也将显著减少。

#### 4.2 人工影响雨淞试验设计

由上面分析可知,雨淞(含雨夹雪、冰粒)的冷却层气温为  $0 \sim -8.9^{\circ}\text{C}$ ,平均厚度为 1979m,平均上界高度为 2025m;最低气温为  $-5.2 \sim -8.9^{\circ}\text{C}$ ,高度处于 882~1892m 之间,平均高度为 1342m。由图 5 可以看出,雨

淞发生时,500hPa 以下是大范围的下沉气流;雨淞发生前,中、低空上升气流也较弱,800hPa 及以下层的上升气流一般在  $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下。如果在雨淞发生时或发生前,使用人影作业飞机进入冷却层或沿其上界飞行,播撒人工冰核或致冷剂,催化剂可望进入到冷却层发生冰晶效应。在地面重点地区布设人影作业高炮(火箭),将携带 AgI 的炮(箭)弹射入到冷却层最低气温所在高度(均值为 1342m、 $-7.0^{\circ}\text{C}$ )附近,可望获得较高成冰性能。在山地迎风坡布设地面自动燃烧炉,也能将 AgI 微粒带入到冷却层。如果有足够多的人工冰核进入到冷却层通过冰晶效应转化过冷液水,则过冷液水将会通过雪花或者霰的形式降落到地面,雨淞将无法形成。如果只消耗部分过冷液水也能减轻雨淞的冻结厚度和危害程度。

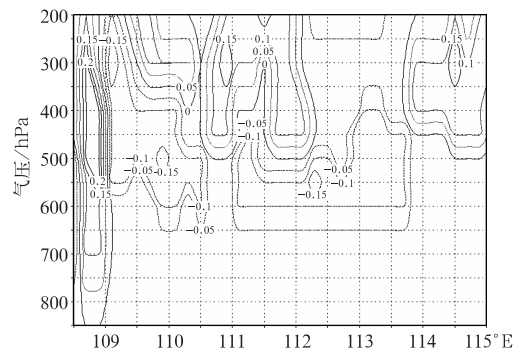


图 5 人工增雨云系模式模拟的 2008 年 1 月 28 日 23 时沿  $28.0^{\circ}\text{N}$  剖面上垂直速度分布(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

另外可以考虑在电网、交通等需要防冻雨的重点保护地区多布设高炮,加大作业次数和炮弹发射数量。许焕斌等<sup>[16]</sup>对爆炸效应作了系统的分析,爆炸对云微物理过程的作用有两个方面,一是爆炸对过冷滴的冻结作用,二是爆炸引起的滴破碎作用。爆炸中 90% 的能量以冲击波的形式向外传,而冲击波会触发过冷水滴冻结。美国的冬季野外喷泉实验<sup>[17]</sup>指出,当温度为  $-4^{\circ}\text{C}$  时,触发冻结

的冲击波临界强度约为  $7\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 随温度降低而减小, 并认为冲击波触发过冷水滴冻结的能力, 在自由大气中比实验室内大一些。徐华英等<sup>[18]</sup>曾做过爆炸影响上升气流的模拟试验, 根据冲击波强度和距离关系推算, 对三七炮弹在 7m 处, 临界强度为  $100\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 在 20m 处还有  $20\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。爆炸可使  $800\mu\text{m}$  以上的滴破碎到  $800\mu\text{m}$  以下, 滴大小会影响流场和粒子的末速, 进而决定粒子的增长和运行轨迹。虽然单发炮弹作用半径是百米尺度, 但人影作业常常是几十、上百发炮弹, 叠加起来可以达到几百米范围。

### 4.3 需要注意的问题和解决办法探讨

飞机作业时, 要注意避免飞机积冰事件发生。地面作业时, 需要更短引信人雨弹(火箭弹)、地面燃烧炉需能低温启动。

就湖南人工影响雨淞而言, 带有除冰装置的作业飞机可以从离长沙直线距离约 300km 的位于湘西北的张家界荷花机场起飞, 备降于湘西怀化的芷江机场, 造成此次特大冰冻灾害的地面冷空气路径偏东, 湘西地区影响相对较小, 长沙黄花机场在冰冻期间的地面除冰设备就多从荷花机场紧急抽调而来。根据人影业务规范, 三七高炮对空射击和发射仰角通常为  $45^\circ\sim 81^\circ$ , 即使使用最低发射仰角和现行最短引信(7~9s)炮弹, 炸点高度也超过 2500m, 与人工影响雨淞要求的射击高度在 2000m 以下相差较远, 因此需要生产更短引信的人雨弹。鉴于现有人影作业飞机抗冰安全性能较低和地面作业弹药引信过长炸点过高的原因, 作为初期的人工影响雨淞试验, 架设于山地迎风坡的地面燃烧炉是个不错的选择, 而湖南衡山海拔高度为 1000~1300m, 冰灾期间, 冰冻直径超过 60mm, 曾建有衡山云雾所, 是开展人工影响雨淞试验的可选之地, 一种类似于“浏阳花炮”的防冻雨焰花弹也可在此进行试验。

人工影响雨淞是将过冷液水转化为雪(霰)降落地面, 降落形式不同, 但区域降雪(雨)总量不会明显改变, 因催化方式不同局部地区降雪量还有可能增多, 因此实施作业时还要综合评估冻雨与雪灾的影响。

## 5 结果与讨论

(1) 中高纬欧亚地区的大气环流呈现西高东低分布, 有利于冷空气自西北方向沿河西走廊连续不断入侵我国。副高偏强偏北, 稳定维持在我国东南沿海, 使冷暖空气交汇地主要位于长江中下游及其以南地区。南支槽十分活跃, 湖南长时间处于槽前西南暖湿气流之中。这种异常大气环流是造成湖南和我国南方大范围持续低温雨雪冰冻极端天气的根本原因。

(2) 当锋面逆温具有较厚的融化层(或温度较高)和较薄的冷却层(或气温不太低)构成“雨淞层结”时, 就可形成雨淞天气, 近地面的北方冷空气和 700hPa 附近南方暖湿空气的交汇是形成雨淞层结的重要原因。地面冷空气主体偏北、偏东, 不断有冷空气经洞庭湖区补充南下, 侵入湖南的冷锋坡度很小, 冷空气层仅使 800hPa 以下气温降至  $0^\circ\text{C}$  以下, 副高持续偏强, 孟加拉湾为稳定低槽, 高空西南气流很强, 700hPa 暖层得以存在。

(3) 混合云降水是这次冰冻的主要降水机制, 用人工增雨云系模式业务产品对冻雨的形成进行了模拟, “三层模型”和“雨淞层结”可以全面完整地解释冻雨形成的微物理机制和长沙地区冰冻期间主要降颗粒状的霰(冰粒)而少雪花或飘雪的原因。上层水汽凝华成冰晶, 对中层起“播种”冰晶作用; 中层含有丰富的过冷水, 起“供水”作用, 冰晶在此凝华增长随之淞附成霰或碰并聚集成雪花; 中层对第三层播种雪和霰, 使其在第三层融化成雨。雪花和部分霰在融化层基本融化成了



雨滴,并进一步碰并增长,经冷却层以过冷却液态水形式抵达地面形成冻雨。

(4) 根据雨凇的形成机制,结合冷云催化的原理与方法,探讨了人工影响雨凇的可行性。主要工作原理是基于冰晶效应在冷却层中引入冰晶,人工启动“Bergeron 过程”,使过冷云滴和雨滴向冰晶转化;基于爆炸对过冷滴的冻结作用开展高炮防冻雨;使冷却层中的过冷液水以雪、霰或冰粒形式降落地面。

**致谢:** 长沙高空气象探测站提供了探空和地面气象观测资料,特此致谢。

## 参考文献

- [1] 丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J]. 气象学报,2008,66(5):907-924.
- [2] 杨贵名,孔期,毛冬艳,等. 2008 年初“低温雨雪冰冻”灾害天气的持续性原因分析[J]. 气象学报,2008,66(5):737-740.
- [3] 王东海,柳崇健,刘英,等. 2008 年 1 月中国南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因的初步分析[J]. 气象学报,2008,66(3):603-620.
- [4] 黄小玉,黎祖贤,李超,等. 2008 年湖南极端冰冻特大灾害天气成因分析[J]. 气象,2008,34(11):83-89.
- [5] 葛非,肖天贵,金荣花,等. 2008 年低温雨雪天气扰动能量的积累和传播[J]. 气象,2008,34(12):11-20.
- [6] 王凌,高歌,张强,等. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 I. 气候特征与影响评估[J]. 气象,2008,34(4):21-26.
- [7] 高辉,陈丽娟,贾小龙,等. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 II. 成因分析[J]. 气象,2008,34(4):68-73.
- [8] Committee on the Status and Future Directions in U. S. Weather Modification Research Operations, National Research Council @ 2003 National Academy of Sciences. 郑国光,陈跃,王鹏飞,等译. 人工影响天气研究中的关键问题[M]. 北京:气象出版社,2005:24.
- [9] 陈小敏,刘奇俊,章建成. 祁连山云系云微物理结构和人工增雨催化个例模拟研究[J]. 气象,2007,33(7):33-43.
- [10] 赵震,雷恒池. 西北地区一次层状云降水云物理结构和云微物理过程的数值模拟研究[J]. 大气科学,2008,32(2):323-334.
- [11] 顾震潮. 云雾降水物理基础[M]. 北京:科学出版社,1980:173-177.
- [12] 中国气象局科技发展司. 人工影响天气岗位培训教材[M]. 北京:气象出版社,2003:32.
- [13] 黄美元,徐华英. 云和降水物理[M]. 北京:科学出版社,1999:227.
- [14] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社,2003:344.
- [15] 徐玉貌,刘红年,徐桂玉. 大气科学概论[M]. 南京:南京大学出版社,2000:142-146.
- [16] 许焕斌,段英,刘海月. 雹云物理与防雹的原理和设计[M]. 北京:气象出版社,2004:24.
- [17] 许焕斌,段英,刘海月. 雹云物理与防雹的原理和设计(第二版)—对流云物理与防雹增雨[M]. 北京:气象出版社,2006:192.
- [18] 章澄昌. 人工影响天气概论[M]. 北京:气象出版社,1992:216.

# 樊志超等:湖南特大冰冻灾害的云物理特征与人工影响技术探讨

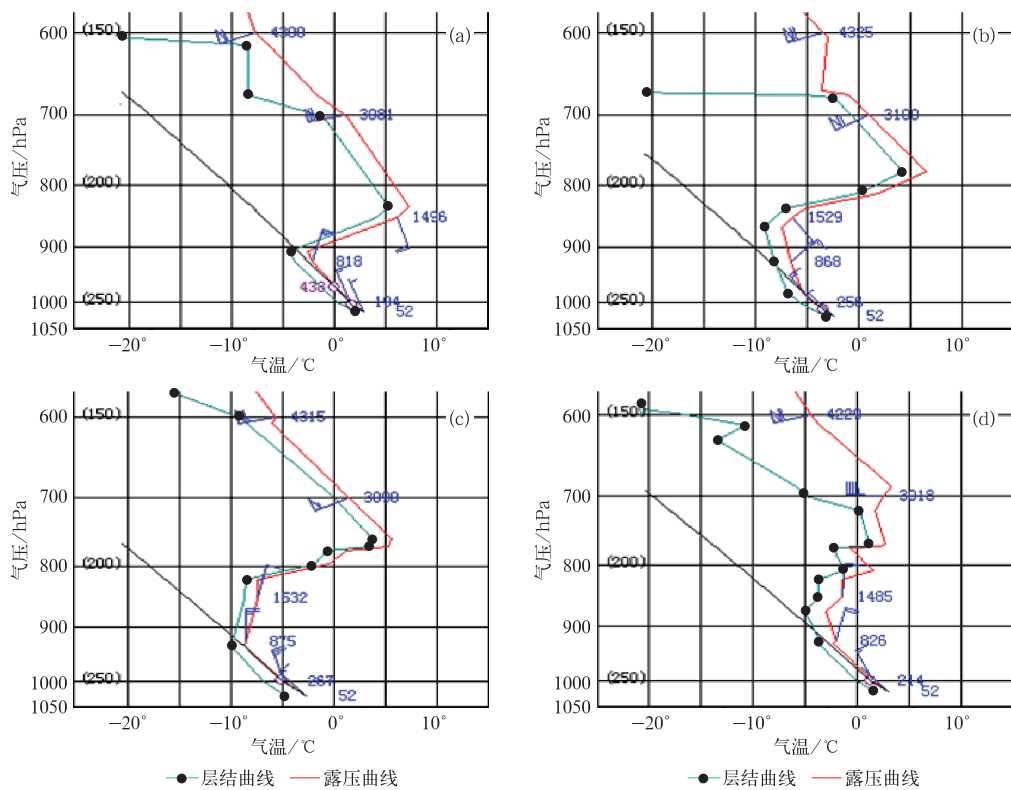


图 1 长沙高空气象探测站冰冻期间典型天气的埃玛图  
 (a) 雨; (b) 冻雨; (c) 冻雨、雨夹雪; (d) 冻雨、雨夹雪、冰粒