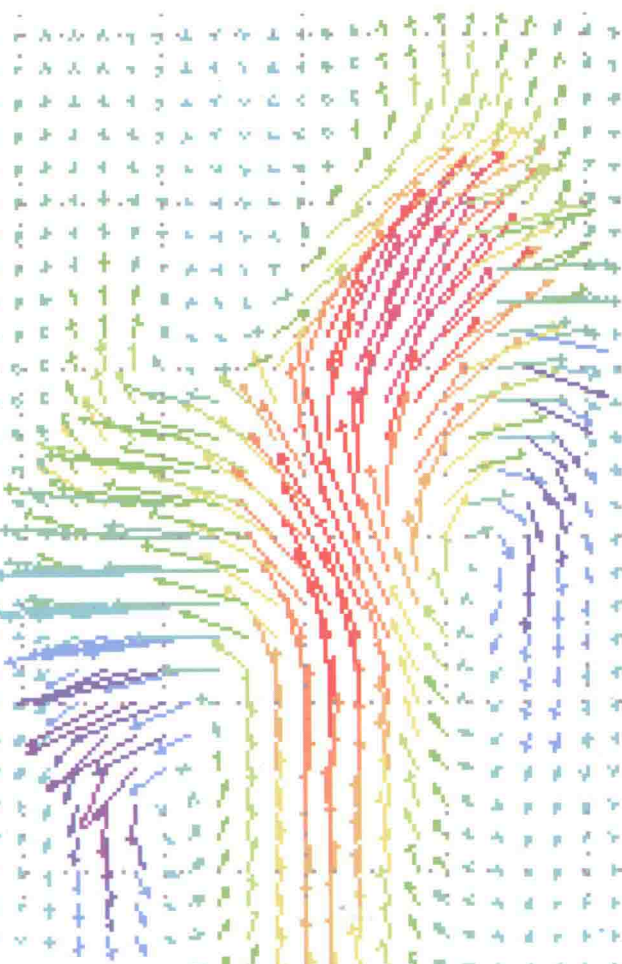


人工影响天气 动力学研究


许焕斌 著



气象出版社
China Meteorological Press

人工影响天气 动力学研究

许焕斌 著

 气象出版社
China Meteorological Press

内容简介

本书介绍了人工影响天气中的动力学研究近况,着重提炼出了动力学疑问及动力效应的机理问题。鉴于所提问题是跨学科的,物理上也具有一些模糊性,因而采用了如下研究思路:以归纳观测现象与演绎物理模型相结合的方式,运用数值模拟再现观测现象的方法,来逐步拟构逼近自然的物理模型。一旦所演绎的模型能正确再现所有观测到的现象,这个物理模型就应是所寻求的某种动力扰动作用机理的体现,找到机理就能解答疑问了。

本书可供从事人工影响天气研究、教学和业务应用的专业人员以及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

人工影响天气动力学研究/许焕斌著. —北京:气象出版社,2014.4

ISBN 978-7-5029-5911-1

I. ①人… II. ①许… III. ①人工影响天气—大气动力学—研究 IV. ①P48

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 060004 号

Rengong Yingxiang Tianqi Donglixue Yanjiu

人工影响天气动力学研究

许焕斌 著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:李太宇

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京京科印刷有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

字 数:200 千字

版 次:2014 年 4 月第一版

定 价:40.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:章澄昌

责任技编:吴庭芳

印 张:10

印 次:2014 年 4 月第一次印刷

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

序 一

地球科学中相当多的领域与人民的生命财产和经济发展有密切关系,雹灾就是其一。为了保护生产成果,广大的劳动人民,特别是雹灾频发的西南地区的劳动人民,发扬了与天斗争的大无畏精神,几百年来用土炮对认为能降雹的云(多数为积雨云)进行轰击以消雹。这自然是一种朴实直观的想法,认为其作用之一——炮的声浪传到云中后可以把雹击碎,或把将成雹的大水滴震碎使其不能成雹。

有良知的科学工作者们,面对劳动人民大规模与天斗争的科学实践,首先是被这种精神所感动,进而有责任去研究它的科学性,并加以改进发展。在20世纪50年代末那个很少浮躁的时代,原中国科学院地球物理研究所有一批年轻人在顾震潮先生带领下开始进行人工降水和人工防雹研究。他们首先将之前人们为消雹所用的土炮改为直接可以将炸药送入云中的高射炮,进而又和原中国科学院声学研究所合作,对土炮轰击时产生的冲击波和声波的强度和衰减进行了布阵测量。那时也是一个大力协同的时代,中央气象局也开始了人工影响天气研究,本书作者许焕斌先生就是其中一位代表人物。

三年“大跃进”后防雹工作仍在继续,但工作的班子换了。当时的一代人能毕其一生直至今日还在研究人工防雹者大概只有许焕斌先生了!当看到这本书的原稿时,我不由得对他的事业执着精神和坚定毅力肃然起敬!

本书不从常规的催化过程而从动力学的观点来研究人工影响天气,特别是人工防雹,这无疑是观念上的发展和创新。在科学真

理的前面是条绵延不断的长河,提出的假设或理论离真理还有多远已并不重要,重要的是毕竟已在长河中向着真理的彼岸游去。书中提出的由爆炸产生的附加雷诺应力,在本是带有湍流性的云中,这个新产生的雷诺应力(如果产生的话)有多大,又如何使云滴不产生冰雹,或对已有的冰雹如何破碎,都是需要进一步研究的十分艰难的问题。探索既然如长河,不必毕其功于一役,自有后来人!

当许焕斌先生责成我为此书写篇序时,作为那个时代的见证人之一,我感慨万千。首先提出中国科学院要研究广大劳动人民迫切需要的人工防雹问题的是顾震潮先生。他是一位才华横溢的科学家,也是一位忠于共产主义的战士。他的贡献不止在人工影响天气方面。原中国科学院地球物理研究所诸多新学科,如数值天气预报、云雾物理、激光测距测颗粒雷达和声测风雷达等,都是在他倡议并领导下开展的。虽然他并没有按现在评估体系写出多少篇“SCI”^{*}文章,但他对新中国大气科学发展的功勋远不是“SCI”文章可以衡量的。值得指出的是,他的英年早逝也与人工防雹有关:当时在“文化大革命”尚未结束的困难条件下,他身为中国科学院大气物理研究所所长,独自一人前往云南再度考察群众土炮防雹经验,身染肝炎又不休息,致使病情加重而去世。

我早已疏于用笔写这类文章,为了表示敬仰群众百折不挠的人工防雹作业壮举,为了纪念顾震潮先生,为了赞叹许焕斌先生,写此短文,是为序。



(巢纪平)

2014年2月28日于北京

^{*} SCI,美国主办的《科学引文索引》期刊的缩写。

序 二

地球大气是一个典型的复杂巨系统,其自组织结构(例如气团、气旋与反气旋和云等)随着时间而处于永不停息的变幻之中,形成了丰富多彩的天气和气候。深入了解和预报大气复杂系统是富有挑战性的科学难题,更别说对其进行人为的控制和干预了。

尽管如此,人们还是利用已经获得的大气科学特别是云物理知识,开展了大量的人工影响天气(例如防雹和人工降雨)的工作,有成功也有失败。我国大气物理学前辈许焕斌先生,在人工影响天气方面有着长期的实践和理论探索,积累了十分宝贵的经验。他不顾年事已高、不辞辛劳把自己的研究成果写成的这本专著,具有重要的科学价值和实际应用价值。

本书最突出的特点,是不仅从云的微物理学、更是从云的动力学角度,来研究人工影响天气的一些基本过程和规律。书中给我印象最深刻的,是关于人工爆炸和飞机飞行引起的大气扰动流场这两个困难问题的处理。著者提出了独到的理论见解,将经典湍流理论和雷诺应力模型拓展到扰动气流的处理,通过引入基于观测和物理假设的“人为扰动”来避开控制方程的闭合问题,并给出了具体的数学模型和数值计算结果,成功地模拟、再现了飞行时的扰动流场、雷诺应力分布和机尾云迹等。

书中还给出了大量的、过去少见发表的观测事实和新颖的数值模拟结果。就我所知,书中的所有数值计算,都是许先生亲力亲为、认真仔细完成的,每一张计算结果图也都是他自己编程画出来的。

他热爱科学、孜孜不倦的探索精神,令后生学子们感到由衷地敬佩!我相信这本书对从事大气物理、流体力学和复杂性科学等领域的研究人员、研究生和大学生,具有重要的参考价值。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters '胡非'.

(胡非*)

2014年3月

* 胡非,中国科学院大气物理研究所研究员。

序 三

许焕斌先生的新著《人工影响天气动力学研究》就要出版了。承蒙先生厚爱,让我先睹为快,提些意见,并顺便写篇序言。先睹为快,挑出几个错别字和标点符号可以胜任,但要为老科学家的专著作序真有些力不从心,只能勉为其难了。

从事人工影响天气科研和实践的科技工作者常常为其催化剂的种类选择、目标云系作业部位和作用方式困惑;也经常确定人工影响天气的效果方面举棋不定和模棱两可;有时也为观测到的现象困惑不已:到底是动力作用还是静力催化?“炮响雨落”、“炮响雹落”有道理吗?如何解释爆炸防雹的作用,等等。

《人工影响天气动力学研究》的内容不同于其他天气动力学和云动力学的著述。作者以亲身参与或对收集到的大量人工影响天气作业观测现象进行深入分析作为切入点,通过理论分析归纳提炼其物理过程模型,并据此设计出数值模式,对人工影响天气中的观测现象进行了成功的模拟再现,并分析诊断其物理效应。全书9章中的前3章以收集到的国内外大量防雹科研成果为基础,归纳提炼出了其物理过程模型。第4章介绍了设计的三个数值模式:三维非静力全弹性云尺度模式(GFEXP)、两相粒子群分档模式(SGBH)、宏微观相耦合粒子群轨迹模式(GFTRAG),并对模式模拟的结果进行了分析诊断。第5章应用这些模式对人工影响天气中的观测现象进行了模拟再现。从第6章开始,作者对动力扰动效应在人工影响天气中的应用进行了全方位的分析,并论述了人工播撒产生的动

力效应。

许焕斌老师是大气物理和人工影响天气科学界的多产作者,其专著在大气科学界和人工影响天气领域有着重要影响。《人工影响天气动力学研究》秉承“许文”一贯风格:有观测现象,也有理论分析;有数值模拟,也有事实再现。许老师在书中不仅总结、归纳了我国人工影响天气实践和基础理论方面的主要成果,更重要的是他在此基础上,开创性地提出了许多新的观点和研究思路。这些观点和思路,对于年轻科学家无疑具有重要的参考价值。



(李培仁*)

2014年2月21日

* 李培仁,研究员级高级工程师,山西省人工影响天气办公室主任。

著者的话

我国用爆炸方式(土炮或空炸炮或炸药包、高炮、火箭)来进行防雹或人工降雨已有几十年的历史了。近代的防雹活动是专业人员参与了民间沿袭下来的土炮轰击冰雹云的活动,经过不断的技术更新已形成一支专业化的队伍。在这个过程中专业人士观察到一些现象,虽然这些现象在现有的科学知识上得到肯定或理解是有障碍的;换句话说,在科学上尚不能给出准确、合理的解释,但也无法在科学上拥有足够的证据去否定观测事件中具有某些科学蕴涵。在这样的情况下,科学家有责任去改变这种迷茫状态。正因如此,再考虑到几十年的防雹实际效果已为农民群众所认可,学术界有些科学家在细心地探索观测现象中得到了一些启示,并多视角地去探讨了其中的科学内涵。在国际上,如意大利、肯尼亚、前苏联也对爆炸防雹作了系列试验和机理探讨。但总体来看,仍处于摸索阶段,尚需逐步触及核心。

从学科性质上来看,爆炸是非常短暂的激烈过程,特征时间小于秒,属高速(马赫数 $M > 1$)空气动力学范畴;而伴随云体或降水变化的运动性质是低速的($M \leq 1$)大气动力学或粒子动力学范畴。高速的爆炸如何去影响低速的运动?瞬时的脉冲又如何去产生滞后较长时间的效应?这本质上是高速流体力学与低速流体力学的相互交叉的领域。从能量上来说,爆炸向大气突然引进了能量,它们如何转化成大气的能量,转化成何种形式的能量,以何种途径来转变?是单爆炸能量的转换,还是相伴着诱导性的另类能量的转换?这是爆炸影响大气(云体、粒子)运动的核心科学问题。

为了面对这样一个跨学科的问题,而且其物理图像尚具有模糊性的状态下,在观念上就不能以原有概念来思考,也不能以现有知识

来推理,更不能以单一的手段来处置。鉴于如此局面,本书不企图正面克服困扰各学科中长期存在的难题,而是以数值模拟再现可信观测现象的方式,来反求处理相关难题的最佳物理模型应是什么样的。为此,拟以下列的步骤来撰写:(1)以观测现象的深入分析作为切入点;(2)继而看能否归纳提炼出可解释这些现象的物理过程模型;(3)据此设计出相应的数值模式;(4)根据所提炼的物理模型和建立的数值模式去成功地模拟再现无(或少)争议的观测现象;(5)接着去模拟再现存有争议的所有已观测到的现象。如果能做到上述五点并成功再现所有已观测到的现象,不仅可佐证观测现象的可靠性,而且表明所提出的物理模型和设计的数值模式基本上是正确的。这样就可以用模拟输出的详细过程资料来探讨爆炸(高速流)如何来影响大气(云体、粒子)低速运动的核心科学问题和其中的影响机理了。

本书的实质内容是人工影响天气中的动力学原理及其应用,遵照巢纪平老师的建议,定书名为《人工影响天气动力学研究》(The Studies of Dynamics in Weather Modification)。

非常感谢巢先生、胡非研究员和李培仁正研级高级工程师对初稿的审阅及提出的指导性意见,感谢他们为本书作序,为今后的研究和应用指明了方向。

本书得以出版,还要特别感谢山西省人工降雨防雹办公室李培仁主任的科研项目、河北省人工影响天气办公室和他们的科技支撑项目《河北省旱季人工增雨(雪)防灾减灾关键技术研究》(项目编号:11277107D)的资助。

著者的愿望是比较全面地汇报在人工影响天气中涉及的动力学现象、疑问和可能的理论性解释,所述结果当然是初步的,即使看起来有道理,也都尚需试验和业务检验。虽然听从了老师和同仁的精心指导,但由于理解不够等因素,一定尚有不妥及错误之处,恳请读者指正为盼。

著 者

2013年12月8日 北京

目 录

序一

序二

序三

著者的话

第 1 章 引论	(1)
1.1 20 世纪 60 年代以来国内外的几次防雷试验和发现	(2)
1.2 本书研究的出发点	(6)
参考文献	(6)
第 2 章 防雷(增雨)效果	(7)
2.1 各地近年来有关防雷效果的报道和分析	(7)
2.2 成果与问题	(11)
参考文献	(12)
第 3 章 观测现象和雷诺应力效应的物理模型	(13)
3.1 引言	(13)
3.2 研究探讨的思路	(14)
3.3 雷诺方程和雷诺应力	(19)
3.4 扰动雷诺应力场的定性分析	(20)
3.5 模拟中扰动雷诺应力场物理模型的构建	(23)
3.6 模拟结果及论证	(25)
3.7 爆炸产生的各种扰动力场及其效应	(28)
3.8 动力扰动雷诺应力场效应的物理模型	(33)
参考文献	(33)
第 4 章 雷诺应力效应的物理模型和数值模式	(35)
4.1 对数值模式的功能要求	(35)
4.2 三维云模式 3DCM(gf)模式	(37)
4.3 两相粒子群分档模式	(42)
4.4 粒子群运行增长模式	(50)

4.5	模拟结果的分析与诊断	(55)
	参考文献	(57)
第 5 章	人工影响天气中观测到的现象与数值模拟再现	(58)
5.1	引言	(58)
5.2	炮击积云试验	(58)
5.3	“炮响雨落”	(63)
5.4	爆炸对雾的试验	(71)
5.5	爆炸对层云试验结果的模拟再现	(80)
5.6	模拟再现雷达回波对爆炸响应的统计结果	(81)
5.7	模拟再现 2008 年奥运会开幕式傍晚作业区雷达回波演变特征	(84)
5.8	作业走廊内的近地面层 θ_w 的变化	(94)
5.9	小结	(97)
	参考文献	(97)
第 6 章	扰动雷诺应力效应在人工影响天气中的应用	(99)
6.1	思路	(99)
6.2	防雹	(104)
6.3	爆炸的微物理效应及防雹	(108)
6.4	增雨	(112)
6.5	火箭扰动增雨动力原理的模拟研究	(114)
6.6	提高云系统的整体效率	(117)
6.7	闪电(自然、人工)的“雨泻”(rain gush)效应及应用	(117)
6.8	动力扰动防雷	(119)
6.9	动力扰动防电线积冰	(120)
6.10	低层爆炸对上空对流云的影响	(124)
	参考文献	(126)
第 7 章	播撒的动力效应	(127)
7.1	辛普森和奥维尔的动力播撒概念	(127)
7.2	奥维尔对层状云动力播撒的模拟	(128)
7.3	影响对流云(积云)发展路径及其终态	(131)
7.4	调节台风的吸湿核播撒	(132)
7.5	高浓度高比重粒子群播撒的负载动力效应	(134)
	参考文献	(137)

第 8 章 结论、讨论及展望	(139)
8.1 结论	(139)
8.2 讨论	(140)
8.3 展望	(142)
参考文献	(143)
第 9 章 结束语	(144)
参考文献	(145)

第1章 引论

人工影响天气动力学应包含两方面的内容：一是人工影响对象的自然动力学；二是如何施加人工动力影响的动力学。

为什么人工影响天气需了解自然天气动力学呢？因为对于形成某种天气现象，自然过程并不总是最佳的，且可有多种途径，这就需要知道自然系统运行的种种情景，考察自然实例系统运行中的缺陷，并进行人为干预使之最佳化（拾遗补缺）。所以需要探讨自然天气系统的结构及演化规律。

人工影响天气的对象多是伴有云降水的湿过程，其学科基础是湿中、小尺度天气动力学和云—降水物理学，需要把天气学、动力学和云—降水物理学三者融为一体。对于这样的系统其动力学的特点是：系统常不是平衡态（非时变、无通量），甚至不是定态（非时变），而是在天气—动力—大气物理相互作用下进行调整演化的过渡态。为此，不仅要了解系统当时的结构（初值），还需估计演化方向和在这个方向上走多远（步长）再转向，或说掌握演化路径（演变）。要作到这些，单一的观测或理论或数值模拟是难以做到的，需要观测——理论（实验）——数值模拟相结合。这不仅是人工影响天气的学科发展问题，也是大气物理融入气象业务主流（天气、气候、大气环境）和气象业务发展走向精细化之必须。所以，这应该是动力学研究的新方向，需要大气学科的各分支学科的学者协同努力才可能有所作为。

人工影响天气动力学的另一个方面是如何依据动力学规律来影响天气系统的动力演化进程？云体，特别是强对流云，有自己的特征流场来支撑某些天气现象的形成，如冰雹、强阵雨、对流大风、下击暴流、龙卷等。如果能对这种特征流场进行人为调节，就有可能变更这类灾害性天气现象的形成进程。

如何来调制云体的环流形态呢？既然要调制，人为动力干预就得具有可扬可抑的双向功能。现用的动力干预手段是爆炸、火箭和飞机的高速飞行等，它们能否具有这样的功能？考虑到它们能造成人为扰动场，场的尺度通常比云体的环流流场尺度小，其相互作用的性质是局地扰动场对背景流场的影响，这样的问题只有可能用湍性流体力学中的雷诺方程来描述。当然与该方程在其他

领域中运用时一样,也需要解决在本领域运用中存在的一些难题,如:正确描述雷诺应力场的问题。

本书的主要内容就是围绕着这个主题分章、节来论述的。

先从回顾我国爆炸防雷活动的沿革开始吧。

我国用爆炸方式(先是用土炮、空炸炮或炸药包,后来用高炮、火箭、人工引雷等)来进行防雷或人工降雨已有几十年的历史了。近代的防雷活动是专业人员参与了民间沿袭下来的土炮轰击冰雹云的活动,初期是怀着“知识分子向群众学习”的心情来作实地观察的。在这个过程中,专业人士观察到了一些现象,虽然这些现象在科学上得到肯定或在理论上能够解释是有障碍的,但一些实地观察的科学家还是感到有些惊奇,也敏感地看出了其中的一些端倪,想去探讨其中的科学内涵。为此,设计了一些专门试验。对于想从民间传统作法中探求现代科学内涵来看,较全面地了解这种做法,即使是直观的、零星的,也是十分必要的,为此把收集到的相关报道尽可能地详列如下。

1.1 20世纪60年代以来国内外的几次防雷试验和发现

中国科学院地球物理研究所二室(中国科学院大气物理研究所的前身)组成了以巢纪平(当时是助理研究员)为首的科研组,于1960年在北京八达岭使用无缝钢管制成的类似土炮进行了地面人工降雨的试验。他们对于一个将会下雨的浓积云进行炮击,炮击后1~2 min就降了一阵雨,雨停后再炮击,又降了一阵雨,先后三次“炮响雨落,炮止雨停”。

中国科学院大气物理研究所1973—1974年在山西昔阳进行防雷期间,用三七高炮轰击了浓积云、积雨云和降水性高层云,共计做了44次,对其中浓积云与积雨云轰击36次,除4次未取得资料和3次炮击前后均无降水外,经炮击后的云体降雨强度皆出现增大,雨强明显增大的有12次。他们在对8次炮击高层云试验中,有6次观测到炮击后雨强和雨滴浓度明显增加。1973年他们对浓积云和淡积云的云头进行了8次炮击,炮击后云体皆快速消散。1974年7次炮击浓积云和淡积云,2次炮弹未入云,入云的5次中有4次云明显消散,炮击后还观测到云泡外形结构出现窟窿的。1974年7月19日在炮击后1 min 45 s,就观测到炮弹入云爆炸部位云体出现弯钩,宽约100 m。2.5 min后演变成一条宽度为200 m的云缝,3 min后演变成直径约为400 m的窟窿,以后云泡逐渐消失。他们还观测到云经炮击后先快速增长而后消散的例子,如1973年7月26日炮击云的中上部,云立即快速涨大,云体变得松散,而后消散。

中国科学院大气物理研究所于1975年到1977年三年间在有雷达观测情况下又做了对强雹云的炮击观测试验,获得较完整观测资料的有11例,其中雹云10例,每次作业的用弹量是30~300发。雷达观测结果表明:有9次炮击部位出现了回波窟窿、空洞或弱区;炮击后有7次看到回波顶高下降1.6~6 km,云体回波减弱、强区分裂等现象。这些现象的出现是迅速的、“立杆见影”式的。此外,也观测到有5次在炮击后炮击点无降雹,而附近有降雹。

国外一些科学工作者,也在野外对浓积云和雹云进行了多次专业实地爆炸试验。

在20世纪80年代前后,前苏联应用地球物理研究所和高山地球物理研究所的科学家注意到了爆炸的作用,进行了一些实验研究。前苏联科学院应用地球物理研究所的 Вульфсон 等(1972)曾用大口径炮进行了炮击浓积云的野外实验。在当地时间13:45,对一块云底高2000 m,云顶高8200 m的浓积云,用100 mm口径的防雹炮对云炮击。每隔1~2 min发射一枚炮弹,在云内6000 m高度爆炸,共发射4枚。停止射击后7 min,即13:52,云顶下降了1000 m,云顶部花椰菜状的结构消失了,雷达回波强度降低了14 dB;再过3 min后,即13:55云开始崩溃。而后又对云底为2000 m、云顶为7400 m的云体进行炮击,4 min内发射4发炮弹,爆炸高度为5500 m。炮击后6 min,云厚比原来降低到原来厚度的1/4,11 min后云崩溃,雷达回波强度减小36 dB,然后云就消散了。

Бибилашвили(1981)对正在发展成熟的积雨云进行了6次炮击试验。用100 mm口径高炮炮弹在云顶以下1~1.5 km处爆炸,用炮弹1~5发,炮击后观测到爆炸高度处出现空洞,云顶迅速下降,全云步入消散阶段。

Вульфсон 等(1972)解释炮击浓积云顶导致云体消散的原因是,在大气处于湿不稳定层结下,如有一个向下的气流扰动,就可以发展成一支下沉气流。如何产生一个下沉扰动呢?中国学者早先已有理论研究。胡广兴(1962)用非线性理论探讨了对流云的崩溃过程,得出非线性作用和不稳定层结可导致对流云迅速消散,云崩溃是从云顶开始的;巢纪平等(1963)还指出雨滴的下落拖带作用可以激发下沉气流,而且因雨滴的尺度大小不同而有不同的下落末速(滴在重力与阻力平衡时的落速),到地面时大雨滴集中到雨滴群前沿形成强降雨锋。

曾使用爆炸方式来防雹的国家还有意大利、奥地利、肯尼亚等国。意大利北部的一些农民曾把带炸药的小火箭发射到雹云中爆炸来防雹。意大利农民确信:用此法可使雹块变“软”,从而雹块降落到地面时动量大减,不能形成雹灾。