

雷电物理与防雷的原理和设计

——对流云物理与防雷增雨

◆ (第二版) ◆

许焕斌 段 英 刘海月◆著

气象出版社

雷电物理与防雷的原理和设计

——对雷电物理与防雷指南

第二版

李健 编 李健 李健 编



气象出版社

雹云物理与防雹的原理和设计

——对流云物理与防雹增雨

(第 二 版)

许焕斌 段 英 刘海月 著

气象出版社

内容简介

本书以归纳观测事实为基础,以理论分析为主线,用新思路设计的数值模式为工具,探讨了雹(强对流)云物理中的一些关键性问题,勾画出了新的雹云宏观结构与微观冰雹(霰、雨)粒子群之间的相互作用和大雹(霰、大雨粒子)生长机制的物理模型,给予了初步的观测及理论验证;对播撒防雹理论中的一些科学问题做了明确和深化,对实施中的一些疑问做了澄清;对空中爆炸产物对云体的宏观流场及微观粒子群行为的影响原理做了系统的探讨;对播撒与爆炸在防雹中的作用性质及如何搭配做了论述并据此提出了新的防雹概念模型。结合河北省的防雹实践,对如何实施防雹提出了具体的设计方案。在本次再版中增加了“积云(对流云)物理和积云增雨”一章。

本书可供大气物理学、中小尺度天气动力学研究人员,短时天气预报员,人工影响天气工作者和有关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

雹云物理与防雹的原理和设计 对流云物理与防雹增雨 许焕斌,段英,刘海月著.

北京:气象出版社,2004.9

ISBN 7-5029-3826-5

I. 雹... II. ①许... ②段... ③刘... III. 防雹-研究 IV. P482

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 093074 号

出版者:气象出版社

网 址: <http://cmp.cma.gov.cn>

E-mail: qxchbs@263.net

责任编辑:李太宇 张锐锐

封面设计:张建永

印刷者:北京中新伟业印刷有限公司

发行者:气象出版社

开 本: 787×1092 1/16 印 张: 19.5 字 数: 499 千字

版 次: 2006 年 7 月第二版 2006 年 7 月第二次印刷

书 号: ISBN 7-5029-3826-5/P·1347

印 数: 2001~4000 册

定 价: 50.00 元

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮 编: 100081

电 话: 总编室: 010-68407112 发行部: 010-62175925

终 审: 周诗健

版式设计: 安红霞

序 一

我国是一个多雹灾的国家,人工防雹很需要,而雹云物理是防雹的科学基础。鉴于冰雹云是属于中小尺度现象,一般的常规观测手段难以去了解它的结构和演变,需要组织综合探测。虽然我国目前尚未组织和实施过这类专门项目,但在实际观测和分析中已发现了我国的雹云结构和演变特征,与国外已组织过的多个冰雹研究计划中给出的结果有相当大的相似性。借用国外的综合观测结果,结合我们的观测实例,再用新思路和新工具来探讨我国的雹云物理的基本规律是可行的。这本书就是按这一思路来深入探讨了一些关键问题,在探寻大雹生长机制的动力学模型上给出了一些新的结果。

在防雹原理上,国外多采用“播撒”防雹原理,而我国的防雹作业则伴有爆炸,观测到爆炸产生的效应。本书对播撒防雹原理中的一些科学问题做了明确和深化,对实施中的疑问做了初步澄清;又特别对空中爆炸对云体的宏、微观场的可能作用做了系统的探讨。根据近来的研究结果,给出了新的防雹概念模型,并结合河北省的防雹实践给出了具体的实施方案,可供参考。

雹云物理和防雹是一项复杂而困难的科学技术课题,虽然近代的雹云物理研究和防雹的活动从20世纪50年代以来已有近50年的历史,多个国家组织过大型综合观测研究,也出版了许多文章和书,但在雹云宏、微观场相耦合的动力学研究方面仍需努力。

赵柏林

2004年6月12日于北京

赵柏林:中国科学院院士,北京大学教授

序 二

冰雹是一种固态降水物,产生于强对流云——冰雹云中。一场强烈的降雹可产生局地毁灭性的灾害,导致农作物毁种或绝收,尤其是对烟草、棉花、水果等经济作物的损害更为严重。我国是世界上四大多雹区之一,冰雹灾害也是我国最严重的气象灾害之一。1990—2000年,我国平均每年遭受冰雹灾害的农田面积达到2500多万亩,造成的直接经济损失达到十多亿元。为此,全国各地普遍开展了人工防雹作业。2003年,全国有23个省(区、市)组织了高炮、火箭防雹作业,动用“三七”高炮六千多门,火箭发射架三千多台,防雹保护区面积达41万余平方公里,其作业规模居世界第一。据估算,防雹作业可减少雹灾面积40%~80%,平均每年可减少经济损失数亿元,深受广大农民群众和各地政府的欢迎。

人类很早就设想用各种办法防御冰雹灾害。自20世纪初以来,科学家对自然冰雹进行观测,从理论、室内实验、数值模拟、野外观测等方面揭示冰雹形成、发展的规律,探索防雹的科学方法,取得了相当大的进展,积累了许多的知识和经验。然而,自然冰雹形成、发展过程非常复杂,人工防雹又是一项技术复杂且难度很大的工作,特别是受难以直接入云观测的限制,人们对自然冰雹形成、发展规律的认识,对有效地防御冰雹灾害的理论和技術,仍在探索之中。

为了适应社会经济发展的日益增长的需求,利用人们已掌握的知识和技术,科学地设计和开展人工防雹作业,提高人工防雹作业水平和效益,是摆在云物理和人工影响天气科技工作者面前的一项历史责任。为此,许焕斌、段英、刘海月合著的《雹云物理与防雹的原理和设计》一书,正是满足这一客观迫切需求,在冰雹与防雹理论与实践的结合点上,比较系统地总结了冰雹与防雹理论和实践,并以观测事实为基础,以理论分析为主线,用数值模式为工具,探索了雹云物理中的一些关键性问题,勾画了新的自然雹云宏观场与冰雹微观场相互作用的图像,以及大冰雹生长机制的物理模型。书中还结合他们的科学实践,对雹云物理和人工防雹的新物理模型进行了初步的观测和理论验证,提出了防雹的新概念模型,特别是又结合河北省人工防雹作业的实践,探索并提出了如何有效地实施防雹作业的实用技术及方案。这是一部具有理论和实践价值的著作,针对性、科学性和实践性强,对冰雹理论研究和人工防雹作业均具有很强的指导作用,对提高我国冰雹研究和人工防雹作业科学水平具有重要的促进作用。

同其他学科一样,云物理与人工影响天气学科也需要在理论与实践的相互作用中不断发展、完善与成熟,需要广大科技工作者用辛勤劳动与汗水对其进行精心培育。可以相信,在本书的引领下,将会有更多、更好的云物理与人工影响天气方面的专著面世,为云物理与人工影响天气学科的发展做出新贡献。

郑国光

2004年6月28日于北京

前 言

从 1978 年至今,国内关于冰雹和防雹方面的专著有五种。一是《冰雹概论》,作者是雷雨顺、吴宝俊和吴正华,于 1978 年出版,内容侧重于冰雹天气动力学;二是《冰雹微物理与成雹机制》,作者是徐家骝,1979 年出版,着重描述了冰雹的微观物理学和冰雹形成机制;三是《人工防雹导论》,由黄美元、王昂生等编著,于 1980 年出版,是一部内容十分全面的书,涵盖了冰雹的形成、探测、识别、预报、防雹原理、效果检验及防雹布局等;四是《人工防雹实用技术》,编著者是王雨增、李风声和伏传林,于 1994 年出版,内容偏重于实用技术和方法;五是《冰雹》,作者是段英、赵亚民,这是一部文献资料式的著作,图文并茂,给出了河北省 1950~1999 年近 50 年的冰雹天气实例,1999 年出版。这些专著对指导我国的冰雹研究和提高防雹科学技术水平都起到了重大作用。

1996 年河北省立项了重大课题“人工防雹与农业减灾的研究”,经过项目课题组 5 年的努力,获得了一批新的结果。本书作者是该项目的承担者,为了系统地介绍这些进展,我们撰写了《雹云物理与防雹的原理和设计》一书。本书不拟全面复述已有的知识和成果,而是希望提出一些关键性科学问题,再以归纳观测事实为基础,以理论分析为主线,以采用新思路设计的数值模式为工具,对提出的关键问题予以深入研究,力求给予澄清或提出解决方案。本书共分三编 11 章,内容包括雹云物理及数值模式、防雹原理和防雹实施方案的设计。第一、二编的 1~7 章由许焕斌撰写,第三编中的第 9、10 章由段英撰写,第 8、11 章由刘海月撰写。

赵柏林院士和郑国光研究员(博士生导师)为本书写了序,章澄昌教授、郑国光研究员审阅了全书,作者在此表示衷心的感谢!

我们热忱地把本书奉献给大家,更诚恳地希望得到读者的指正。

许焕斌 段 英 刘海月

2004 年 1 月于北京

再版者的话

《雹云物理与防雹的原理和设计》第一版是在 2004 年 9 月出版的,至今已过去了近两年的时间。这次再版时,把原书中的错误予以了改正,并与时俱进地作了一些充实。由于水资源的短缺,我国各地广泛开展了开发空中水资源的人工增雨活动。积云(对流云)降水占有很大比例(约占 $3/4$),且对流云是凝水量丰富的云,又是自然降水效率较低的云,因而增雨潜力巨大。但是近来的对流云增雨计划表明,对浮动云体的增雨作业,增雨率较大也较明显;但对于固定地区是否可以增加降水量则难以确定。这意味着对流云的人工增雨的方案(静力催化或动力催化)有可能在增强了个体对流云的发展的同时却降低了云体的降水效率,从而使区域内的水汽转化为降水的份额并未增多。这对于开发空中水资源以图增加区域降水量的努力来说是不期望见到的。看来需要探求的是:如何才能提高区域内对流云群水汽转化为降水的效率问题。这必然涉及对流云的宏观动力过程和微观降水过程之间的相互作用如何能达到最优,为此要弄清楚自然阵雨的形成机制。鉴于冰雹云和积云都是属于对流云类,只是强度不同,为此,根据将近两年来我们对积云(对流云)物理、阵雨形成机制和积云(对流云)增雨方面做过的工作,由我执笔予以汇集整理,写成“积云(对流云)物理和积云增雨”作为第二编的第八章,而第三编的第八、九、十和十一章,依次递改为第九、十、十一和十二章。

非常有幸把再版的书奉献给读者,仅供大家参考,并恳请予以指正!

许焕斌

2006 年 4 月 26 日于北京

目 录

序一

序二

前言

再版者的话

第一编 雹(强对流)云物理	(1)
第一章 冰雹微物理	(1)
1.1 冰雹	(1)
1.2 冰雹的微物理结构特征	(3)
1.2.1 雹胚	(3)
1.2.2 雹块的结构	(3)
参考文献	(4)
第二章 冰雹(强对流)云	(5)
2.1 冰雹云	(5)
2.1.1 上升气流的速度需大于 15 m/s	(5)
2.1.2 云体具有深厚的负温区	(6)
2.1.3 长的生命史	(7)
2.2 冰雹云的分类	(7)
2.3 冰雹云的发展过程	(9)
2.4 冰雹云的物理模型	(11)
2.4.1 雹云雷达回波和气流结构模型(Browning, Ludlam 1962)	(12)
2.4.2 累积带冰雹形成模型(Сулаквилдзе 1967)	(14)
2.4.3 超级单体冰雹云模型	(16)
2.4.4 单体冰雹云模型	(23)
2.4.5 有序多单体冰雹云模型	(24)
2.4.6 超级单体——龙卷模型	(25)
2.4.7 其他类雹云模型	(27)
2.5 冰雹云类型与环境场的关系	(27)
2.6 冰雹云的移动、传播和分裂,积云的合并	(29)
2.6.1 移动和传播	(29)
2.6.2 分裂和合并	(35)
2.7 冰雹云单体的组合(织)和雹云云系	(40)
2.8 强对流(雹)云的地面观测的物理特征	(46)
2.8.1 强对流(雹)云过境时地面气象要素场的变化	(46)
2.8.2 雹云地面降雹带(雹击带)	(48)
2.9 冰雹云的观测特征	(50)
2.9.1 冰雹云的雷达回波特征	(50)
2.9.2 冰雹云的闪电特征	(55)

2.9.3 冰雹云的声信息	(56)
参考文献	(57)
第三章 冰雹形成机制	(59)
3.1 雹胚的形成	(59)
3.1.1 凝结(华)增长	(59)
3.1.2 并合增长	(61)
3.1.3 雨滴冻结	(65)
3.2 雹块的增长	(65)
3.3 冰雹形成机制的研究思路 and 方案	(67)
3.4 冰雹粒子群的运行增长规律	(67)
3.4.1 理想环境场的静态模拟和动态模拟	(71)
3.4.2 实例模拟	(78)
3.4.3 模拟结果的讨论	(82)
3.4.4 小结	(84)
3.5 强对流(雹)云中水凝物粒子的积累	(85)
3.5.1 云中粒子群的累积	(85)
3.5.2 对流云中粒子群累积的数值模拟	(86)
3.6 强对流(雹)云中云水的消耗	(89)
3.6.1 大粒子在增长运动中对云水场的消耗	(90)
3.6.2 结语	(91)
3.7 强对流(雹)云中的特征回波结构的数值模拟	(92)
3.8 冰雹的分层结构的模拟试验	(93)
3.9 规律的再现和观测验证	(95)
3.9.1 “零线”和回波模拟与多普勒雷达观测事实的比较	(95)
3.9.2 再现	(97)
参考文献	(99)
第四章 强对流(雹)云数值模式	(100)
4.1 引言	(100)
4.2 强对流(雹)云的性质和对模式的宏观动力、热力场描述功能的要求	(100)
4.2.1 动力框架	(100)
4.2.2 边界条件和初始条件	(103)
4.2.3 差分计算方法	(105)
4.2.4 宏观场方程组	(106)
4.3 适合于强对流(雹)云的冰雹形成机制的微物理框架	(108)
4.3.1 冰雹是降雨(雪)过程的进一步发展	(108)
4.3.2 冰雹形成的微物理过程的参数化描述方案	(111)
4.3.3 冰雹(降水粒子)形成的微物理过程的粒子群分档描述方案	(117)
4.4 方程的数值解法	(119)
4.4.1 Euler 式差分解法	(120)
4.4.2 半 Lagrange 解法	(122)

4.4.3 全 Lagrange 式的粒子增长运行模式(轨迹模式, H3TRAJ)	(123)
4.5 综述	(126)
附录 1 国内有关云模式研究和应用的情况简介(附表 1~4)	(128)
附录 2 各发生项和转化项的表达式	(131)
附录 3 水凝物和水汽场之间的平衡调整	(147)
参考文献	(148)
第二编 防雹原理和积云增雨	(149)
第五章 播撒防雹原理	(149)
5.1 播撒防雹原理	(149)
5.2 播撒防雹原理实施中的问题	(152)
5.3 最近雹云物理的进展对四个命题的回答	(154)
5.3.1 第一个命题(雹胚形成和大雹运行增长)的回答	(154)
5.3.2 第二个命题(及时有效的“利益竞争”)的回答	(156)
5.3.3 第三个命题(多型多变的雹云中的规律)的回答	(156)
5.3.4 第四个命题(人工雹胚的浓度)的回答	(157)
参考文献	(159)
第六章 爆炸防雹原理	(161)
6.1 引言	(161)
6.2 爆炸对云体的作用表现	(161)
6.2.1 农民和地方政府的评价	(161)
6.2.2 统计检验	(162)
6.2.3 物理变化	(163)
6.3 爆炸产物和它们对云过程的可能作用	(169)
6.3.1 爆炸产物	(169)
6.3.2 爆炸碎片	(170)
6.3.3 冲击波	(172)
6.3.4 声波	(174)
6.3.5 扰动气流	(182)
6.3.6 重力波	(190)
6.3.7 爆炸的微物理防雹作用	(192)
6.3.8 讨论	(196)
6.4 爆炸作用的外场试验取证和数值模拟再现	(196)
6.4.1 爆炸对雾影响的数值模拟(实验结果的再现和理论的检验)	(196)
6.4.2 外场炮击云试验	(200)
6.5 炮响雨落数值模拟试验	(204)
6.6 爆炸扰动气流场对大气稳定度的影响	(206)
6.7 本章小结	(207)
6.7.1 爆炸防雹原理	(207)
6.7.2 爆炸作用与播撒作用的结合	(208)

6.7.3 关于雷电的作用	(208)
6.7.4 关于云顶爆炸的反应	(209)
6.7.5 关于火箭发射中的激波和尾流的作用	(209)
6.7.6 关于在雹云中实施爆炸后地面观测到降软雹的问题	(209)
6.7.7 进一步的工作	(210)
参考文献	(210)
第七章 防雷概念模型	(212)
7.1 防雷概念模型简介	(212)
7.1.1 一维模型	(212)
7.1.2 二维模型	(212)
7.1.3 三维模型	(214)
7.2 新的防雷概念模型	(215)
7.3 零线和作用区的判定	(218)
7.3.1 多普勒雷达观测方法	(218)
7.3.2 一般雷达观测方法	(218)
7.3.3 目测方法	(218)
7.4 防雷区布局原则	(219)
7.5 本章小结	(220)
参考文献	(220)
第八章 积云(对流云)物理与积云增雨	(221)
8.1 引言	(221)
8.2 积状云降水的一些观测事实	(223)
8.3 阵雨形成机理	(224)
8.3.1 研究方案	(224)
8.3.2 合成旋转环境风场的模拟结果	(226)
8.3.3 合成静风场(理想)个例(xgl-hr)	(234)
8.3.4 实例模拟的模拟结果	(236)
8.4 分析和讨论	(242)
8.4.1 “零域”的动力特征和大粒子形成“穴道”	(242)
8.4.2 粒子的集中和积累	(243)
8.4.3 关于主入流区	(243)
8.4.4 大粒子的循环增长	(244)
8.5 积云人工增雨实施方案的设计	(244)
8.6 对流云物理和对流云增雨	(245)
8.7 结语	(247)
参考文献	(248)

第三编 防雹实施方案的设计	(249)
第九章 冰雹预报与冰雹云识别	(249)
9.1 冰雹预报	(249)
9.1.1 有利于产生冰雹的天气形势	(249)
9.1.2 冰雹与高空急流活动的关系	(250)
9.1.3 冰雹与高空冷空气活动的关系	(250)
9.2 雷达回波判别冰雹云	(250)
9.2.1 多普勒天气雷达冰雹云回波特征	(250)
9.2.2 数字化雷达冰雹云回波特征及判别指标	(254)
9.2.3 常规雷达冰雹云回波特征	(255)
9.3 闪电定位系统判别冰雹云	(256)
9.3.1 闪电频数的月变化	(257)
9.3.2 闪电次数的时变化	(257)
9.3.3 冰雹云闪电特征	(258)
9.4 卫星云图识别冰雹云	(261)
9.4.1 冷涡后部对流云团	(261)
9.4.2 冷锋云系前方对流云团	(261)
9.4.3 冷锋云系前沿对流云团	(261)
9.4.4 云顶温度判别指标	(262)
9.5 冰雹云的宏观识别	(262)
9.5.1 利用冰雹云的外貌形态识别	(262)
9.5.2 利用声音识别	(262)
9.5.3 利用光识别	(262)
9.5.4 从地面气象要素演变特征识别冰雹云	(263)
参考文献	(263)
第十章 防雹的条件及外场作业(试验)方案设计	(264)
10.1 我国人工防雹的发展历程	(264)
10.2 自然降雹特征	(265)
10.3 防雹网的布局与外场环境条件的选择	(269)
10.3.1 高炮作业点的布设及环境条件的选择	(269)
10.3.2 火箭作业点的布设及环境条件的选择	(269)
10.4 作业工具与弹药	(270)
10.4.1 “三七”高炮和炮弹	(271)
10.4.2 火箭发射系统	(272)
10.4.3 地基碘化银发生器	(277)
10.5 高炮防雹、增雨作业(试验)方案设计	(277)
10.5.1 防雹作业方案的设计	(277)
10.5.2 火箭防雹作业方案设计	(280)
10.6 高炮、火箭防雹(增雨)作业(试验)的资料获取	(280)
10.6.1 资料收集的内容	(281)

10.6.2	雷达资料的收集	(281)
10.6.3	降雹及灾情资料	(281)
10.6.4	作业点及作业区雨量资料	(281)
10.6.5	地面防雹增雨作业记录	(281)
参考文献		(282)
第十一章 防雹作业的决策指挥和组织实施系统		(283)
11.1	人工防雹的监测预警(决策指挥)系统	(283)
11.2	防雹作业的(预警)决策指挥系统功能与总体设计	(284)
11.2.1	系统的整体设计	(284)
11.2.2	系统的功能及分系统设计	(285)
11.2.3	闪电定位联网系统	(287)
11.2.4	通信与网络	(287)
11.2.5	微机及网络设备	(287)
11.3	系统的设计原则	(288)
11.4	人工防雹的组织实施	(289)
11.4.1	高炮人工增雨、防雹作业(试验)的组织实施	(289)
11.5	作业的安全管理	(290)
第十二章 防雹效果的检验和效益评估		(291)
12.1	统计检验	(291)
12.2	区域回归试验	(292)
12.3	防雹效果的物理检验与分析	(293)
12.3.1	测雹板资料获取与分析方法	(294)
12.3.2	邻近两个测雹点的对比分析	(295)
参考文献		(296)

第一编 雹(强对流)云物理

雹云物理学可分为两部分:一是关于雹粒子(群)的物理学,可称为冰雹微物理;二是关于雹云动力(力场、流场)、热力等方面的物理学,又可称为雹云宏观物理。

第一章 冰雹微物理

1.1 冰雹

冰雹是一种直径大于 0.5 cm 的冰相降水粒子,比它尺度小的称为冰丸(冻雨滴)、霰或米雪。由于它直径大、落速快,只有在强对流云中才有可能形成,因而它是积雨云的降水物,而可降雹的积雨云又称为冰雹云。

观测表明,冰雹具有多种形状,但多数(80%~90%)具有椭球形、球形和锥形。冰雹的切片观测表明,雹块具有分层结构,多数具有一个增长核心,即雹胚,雹胚通常是冻雨滴或霰。冰雹的上述特征,说明冰雹形成过程是在雨(雨滴—暖雨,霰—冷雨)形成的基础上进一步的发展,所以了解冰雹形成过程必须先了解雨形成过程,并需了解在什么条件下进一步向冰雹形成过程发展。

图 1.1 给出了云—雨发展过程与冰雹形成过程的关系图。图中的云滴、冰晶由于尺度小落速慢,常悬浮在云中,故称云粒子;而雨滴、雪、冻滴、雪花、雪团和霰尺度较大,落速较大,可以由云中降落,故称降水粒子(液相或固相),或雨粒子,而大于 5 mm 的固相降水粒子叫冰雹。

图 1.1 给出了几乎全部云—降水物理过程,包括有:简单(暖)液相降雨过程,即水汽凝结产生云滴,经过凝结增长长大成大云滴,启动碰并(云水)增长形成雨滴(暖雨);简单冰相降水过程,水汽凝华形成云(冰)晶,再经过凝华增长成雪晶,雪晶间又可攀附形成雪团,产生降雪(冷雨);混合相降水过程,即除上述两个简单成雨过程外,冰晶还可以由云滴冻结而形成,冰晶可以通过与过冷云滴的淞附而长大,过冷雨滴与冰相粒子相作用而冻结,在汽、液、固三相共存情况下,由于水面饱和与冰面饱和压强差而引起的过冷液滴蒸发而冰粒子在水面饱和的条件下快速凝华增长(所谓贝吉隆过程),液固粒子间的并合增长等等。混合相的降水过程,是最有利于降水粒子(雨、霰、雪、雹)快速形成的。这些都是正过程,特点是粒子尺度在增加,而数目通常在减小。

在图 1.1 中除给出了粒子长大的过程以外,还给出了由大到小的分裂破碎过程,如雪晶

与过冷云滴碰冻淞附过程中产生次生冰晶(繁生),大冰晶的破裂,雨滴的自破,雨滴间的相碰破碎,冰雹湿生长时多余过冷水的剥落等等。这些都与增长过程相反,产生粒子数目的增多,而粒子尺度的减少,是一种反过程。

云—降水过程中的正反过程相互作用,呈现出自然控制和自然激励的现象,例如浓度上的冰晶的繁生,可以产生大量的云冰粒子,在水汽和过冷水有限供应下,阻止了粒子群的整体尺度上的增长,延缓甚至阻止了降水发展。但在另外一些情况下,水(汽)供应充足,冰晶浓度欠缺时,繁生的冰晶可以提供另外的冰晶,增加雨元的供应。再例如在具有强凝结水产生的云中,因破碎和剥落产生的雨元,增加了雨滴的浓度,降水可因雨元浓度的增加而增强;但也有另外一个机制,雨滴的破碎使雨滴的平均尺度减小,导致末速的减小,在上升气流的承托下落不下来;也还可以因产生大量的雨元,为产生更多的冰雹胚胎(冻滴,霰)提供了可能,在过冷水量有限量的情况下,限制了大雹群的形成。

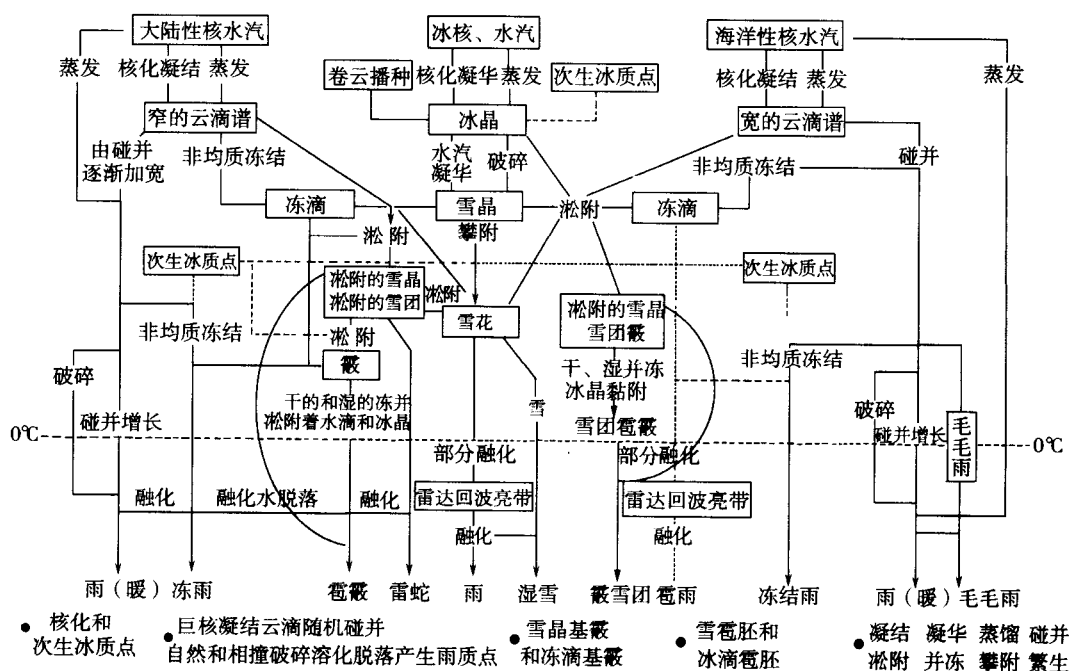


图 1.1 降水云中主要的云—雨发展过程与冰雹的形成

(北京大学地球物理系大气物理教研室云物理教学组 1981)

图 1.1 所列出的水凝物粒子群间的相互作用引起的种种微观过程,哪一些过程被激发,哪一些过程起主导作用,是受云体的宏观动力—热力结构控制的,具体的云—降水过程是云体宏观场与云—降水粒子微观场相互作用的反映。

鉴于冰雹云是强大对流环流和穿越对流层的深厚云体,有强大的水汽辐合和供应,从云底和云顶有巨大的温差,具备激发暖雨和冷雨的优越条件,必然导致降雨过程进一步发展成降雹过程,还启动了一些特殊的增长运行过程,如粒子的下落再入,融化再冻结等特征。

1.2 冰雹的微物理结构特征

1.2.1 雹胚

冰雹由雹胚(生长中心)和雹块(雹体)组成见图 1.2。雹胚可以看清是冻结的雨滴(冻滴胚)或是霰,但也有区分不清的,即有些雹胚难以判定原生是冻滴或是霰,这可定名为“其他”类。由于冻滴形成后,体密度较大,在云中进一步的生长运行中,其结构不大可能有明显的转化,而霰胚则具有较小的体密度,在进一步的生长运行中,当收集的过冷水较多而来不及立即冻结时,可以被吸入霰胚中去,使之体密度加大,可能成为既非冻滴又非霰的雹胚。如果可以这么理解,则“其他”类雹胚的原生粒子是霰。

图 1.2 为冰雹切片显示出的微结构,由雹胚(增长中心)和具有层次或分层结构的雹块(体)组成。(a)为均匀分层的雹;(b)为非均匀分层的雹。

如表 1.1 所示,我国新疆昭苏、宁夏、青海三地的霰胚比例逐步升高,有可能受地形高度的影响,地势高,云底温度会偏低,因而冷雨过程占优势。这种现象在美国也有表现,如科罗拉多—怀俄明(高原地区),NHRE(美国国家冰雹研究试验)的霰胚比例比俄克拉何马(丘陵草原地区)高。

表 1.1 雹胚的类型和在不同地区占总冰雹数中的百分比

地区	霰(%)	冻滴(%)	其他(%)	冰雹样本总数
新疆昭苏	49	51	—	999
宁夏	71	29	—	395
青海	84	4	12	156
科罗拉多北部	84	10	6	2461
NHRE	87	9	4	3660
俄克拉何马	21	63	16	655
艾伯塔(加)	61	26	13	2110
瑞士	37	63	—	1220
南非 Lowveld	23	62	15	1318
北高加索地区	90	10	—	—

1.2.2 雹块的结构

从图 1.2 给出的冰雹雹块的切片照相可清楚地看到在生长中心——雹胚的外围雹体中具有明显的分层结构,这些结构是由于块雹在不同状态下增长的冰具有不同的物理性状(透明度、气泡含量、晶体大小、局部体密度值)的显示,它们包含着冰雹形成增长的机理,需要注意理解雹块结构的物理含义。