

人工防雹导论

黄美元 王昂生 等 编著

科学出版社

人工防雹导论

黄美元 王昂生 等 编著

科学出版社

1980

内 容 简 介

这是一本论述冰雹和人工防雹基础知识、基本理论以及研究现状的著作。书中所述内容是近代云物理学和人工影响天气的一个重要方面。

全书共分九章,包括冰雹的物理特性、冰雹云及其探测方法、冰雹天气和预报、冰雹形成理论和防雹原理、冰雹云识别、防雹作业和效果检验等章。

本书可供气象工作者、从事云物理和人工影响天气的实验和研究人员参考。也可作为大专院校大气物理专业师生和研究生的教学参考书。

人 工 防 雹 导 论

黄美元 王昂生 等 编著

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980年10月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1980年10月第一次印刷 印张: 13 1/4

印数: 0001—1,900 字数: 302,000

统一书号: 13031·1353

本社书号: 1877·13—15

定 价: 2.10 元

序 言

人工控制天气是劳动人民千百年来愿望，也是随着近代科学发展形成的一门新兴学科。人工防止自然灾害是实现农业现代化、工业现代化、国防现代化和科学技术现代化必不可少的部分。人工防止冰雹灾害就是其中一个重要方面。

冰雹是一种严重的气象灾害。一阵急促而猛烈的冰雹会使贫下中农的辛勤劳动毁于一旦，它是农业上的一大灾害。冰雹造成人民生命财产的损失、影响工业生产、危害国防设施、阻碍交通运输并砸坏建筑物。因此雹区人民迫切要求防止冰雹灾害。

冰雹是一种造成强烈灾害的固态降水物。它是云中宏观动力过程、微物理过程和电过程相互作用的综合结果，是云物理学研究的主要课题之一。冰雹和其它雷暴、暴雨、雷暴大风和龙卷等强烈局地灾害现象一样，都是局地强对流天气现象。产生冰雹的冰雹云是其中一种典型的强对流云体。研究冰雹、冰雹云以及人工防雹对于这类中小尺度天气现象的认识和改造具有一定的普遍意义。此外，就人工影响各种天气这一长远目标来说，冰雹出现的次数比龙卷多，雹云尺度较台风小，在中小尺度灾害性天气里具有一定的代表性。就科学意义来说，进行冰雹和人工防雹研究具有现实性和必要性。人工防雹的进一步研究必将有力地推进人工控制天气的进展。

我国劳动人民很早就注意到冰雹现象了。在云南、甘肃等地，劳动人民用土枪土炮防止雹灾的斗争历史可以追溯到一二百年前，但是，只有在解放了的新中国，规模宏大的人工防雹科学实验和研究工作才能有组织地蓬勃开展起来。二十多年来在这方面取得了很多成绩¹⁾。近年来，国外在这方面的进展也比较迅速。因此很有必要总结国内外这方面的研究成果，系统地论述现代人工防雹科学的现状。本书是在1975年全国人工影响局部天气训练班“人工防雹”讲稿基础上作了较大的修改补充后编写成的。其中部分章节是新写和完全重写的。本书大部分内容结合我国实际，取材于国内研究成果。相当部分是中国科学院大气物理研究所多年来在爆炸影响原理、雹云结构和探测、雹云识别以及防雹效果等方面的主要研究结果。在内容上我们一方面尽可能系统叙述与人工防雹有关的基础知识和基本理论，以便帮助读者掌握这方面的科学基础，另一方面又尽可能反映出当代世界各国在人工防雹方面的先进水平。希望有助于实现我国在这方面赶超的目标。

与整个人工影响天气科学一样，国内外人工防雹还处于试验研究阶段。特别是在冰雹生长、雹云形成和人工防雹原理等基本理论研究方面还不很成熟。这显然是与人们对冰雹和冰雹云的形成原理、物理过程和结构特征认识不够有关。因此本书所介绍的某些理论和观点是作为启发思路、引起读者进一步深入研究为目的的。

全书共分为九章。第一章介绍冰雹和降雹基础知识。第二章扼要讲解了地面冰雹测量、冰雹云垂直气流、水汽凝成物和闪电的常用探测办法。第三章以冰雹云的气流和水汽凝成物分布特点阐述冰雹云结构和模式。第四章介绍冰雹形成过程，包括生长特点、干、

1) 王昂生、黄美元：我国人工防雹科研工作的进展，全国人工影响天气科学技术会议，人工防雹专业组总结报告，1978年

湿增长过程,物理设想,理论计算和融化等节。第五章介绍人工防雹实验常遇到的冰雹天气和预报问题。第六、七两章专讲识别冰雹云,前一章以宏观观测、闪电和雷声为内容,后一章叙述测雨雷达识别方法。人工防雹原理在第八章里介绍,主要包括利用冰晶化催化剂防雹、爆炸影响冰雹云和撒播高浓度粒子群影响对流云的基本原理和实验。最后一章对作业方法和工具、组织布局以及防雹的效果检验进行了介绍。

参加编著的同志是:王昂生(第一、第二、第三、第五、第六和第七章),黄美元(第四、第五、第八和第九章),徐华英(第八章)。此外,王学宽,徐乃璋,郑双治等同志也参加了部分工作。张大平同志绘制全书各图。

本书编著过程中曾征得训练班各地学员和有关同志的宝贵意见;北京大学地球物理系、中央气象局气象研究院人工影响天气研究所、中国科学院兰州高原大气物理研究所和中国科学院大气物理研究所有关同志对书稿也提出了有益的意见,在此表示深切感谢。鉴于作者水平有限,错误缺点难免,欢迎读者批评指正。

编著者 1978年1月30日

目 录

序 言

第一章 冰雹	1
第一节 冰雹的概念	1
第二节 冰雹的物理特性	1
一、冰雹的形状	1
二、冰雹的外观	4
三、冰雹的大小	4
四、冰雹的密度	6
五、冰雹的末速度	7
六、冰雹的层次和结构	9
七、冰雹的胚胎	10
八、冰雹的谱分布	11
第三节 降雹的统计特点	12
一、降雹的地理分布	12
二、降雹的时间分布	14
三、降雹的范围	18
四、降雹的时间	18
第二章 冰雹和冰雹云的探测方法	21
第一节 地面冰雹测量仪器	21
一、冰雹印迹法	21
二、冰雹记录仪器	22
三、冰雹的物理特性测量	23
第二节 冰雹云的垂直气流探测	24
一、气球观测法	25
二、火箭或飞机投掷遥测法	29
三、飞机探测垂直气流	30
四、多普勒雷达探测	31
第三节 冰雹云的水汽凝成物场探测	32
一、与冰雹云探测有关的气象雷达	32
二、测雨雷达探测冰雹云	34
三、双波长雷达探测冰雹云	36
四、飞机观测冰雹云水成物场	38
第四节 冰雹云的闪电探测	39
一、闪电计数器原理	39
二、几种闪电计数器	40
第三章 冰雹云	48

第一节 积云的形成和发展	48
一、大气层结稳定度	48
二、积雨云的发生	50
三、积云动力学方程组	52
第二节 冰雹云的形成条件	58
一、积雨云形成的一般条件	59
二、冰雹云形成的某些特殊条件	59
第三节 冰雹云的水汽凝成物场	62
一、冰雹云的外貌	62
二、冰雹云回波特点	63
三、冰雹云回波结构和它与气流场的关系	65
第四节 冰雹云的垂直气流结构	67
一、强烈上升气流区	68
二、强烈下沉气流区	72
三、其他区域的垂直气流	74
第五节 冰雹云结构和模式	74
一、弱单体雹云	75
二、强单体雹云	76
三、传播雹云	77
四、多单体雹云	79
五、冰雹云结构分类及其特征	80
第四章 冰雹的形成过程	83
第一节 冰雹生长的特点	83
第二节 冰雹的干增长	86
第三节 冰雹的湿增长	91
第四节 冰雹形成过程的几种物理设想	92
第五节 冰雹在云中增长的理论计算	96
第六节 冰雹的融化	102
第五章 冰雹天气和预报	105
第一节 我国降雹的气候特征	105
第二节 冰雹天气	107
一、雹云的天气学分类	107
二、影响降雹的主要天气过程	111
第三节 冰雹预报方法	112
一、天气图预报方法	112
二、单站统计预报方法	113
三、数学物理模式预报方法	115
第六章 宏观观测、闪电和雷声识别冰雹云	120
第一节 宏观识别和群众经验	120
第二节 闪电识别冰雹云	121
一、闪电频数随时间演变特征	122

二、闪电的统计特征	124
三、闪电峰值区特点	125
四、闪电识别冰雹云	126
五、风暴云体闪电特征研究	127
六、闪电仪器单站观测的若干问题	130
第三节 雷声识别冰雹云	131
一、雷声	131
二、雷雨云和冰雹云雷声差异	131
三、雷声识别雹云的可能性	132
第四节 地面气温识别冰雹云	132
一、典型个例	133
二、统计特征	134
三、地面气温识别冰雹云的可能性	134
第七章 测雨雷达识别冰雹云	136
第一节 雷雨云与冰雹云的回波差异	136
第二节 回波参量识别	138
第三节 回波形态识别	141
一、利用平面位置显示 (PPI) 器上的回波形态来识别冰雹云	141
二、利用距离高度显示 (RHI) 器上的回波形态来识别冰雹云	145
三、根据回波运动学特征来识别雹云	147
第四节 回波综合识别方法	149
第五节 识别雹云的雷达新技术	150
一、双波长雷达识别冰雹云	151
二、圆偏振波雷达识别冰雹云	153
三、单部雷达确定冰雹大小的尝试	154
第八章 人工防雹原理	156
第一节 利用冰晶化催化剂防雹	156
一、冰晶化催化剂	156
二、利用催化剂防雹	160
第二节 爆炸方法影响冰雹云	162
一、爆炸影响云雾微物理过程的实验研究	162
二、爆炸影响气流的实验研究	164
三、爆炸影响云雾与降水的野外实验	170
第三节 利用撒播高浓度粒子群影响对流云	179
一、高浓度粒子群下降对空气影响的实验	179
二、撒播高浓度粒子群对积状云人工影响的野外实验	181
第九章 防雹作业和效果检验	187
第一节 作业方法和工具	187
一、地面催化方法	187
二、针对雹源的催化方法	187
三、关于使用三七高炮催化问题	188

四、爆炸方法.....	189
五、关于防雹土炮的几个问题.....	191
第二节 防雹的布局和组织工作.....	196
第三节 效果检验方法.....	197
一、统计对比方法.....	198
二、物理检验方法.....	203

第一章 冰 雹

人工防雹的目的是用人工办法防止冰雹造成自然灾害。本书就从造成自然灾害的冰雹开始讲起。

第一节 冰雹的概念

冰雹是一种从积雨云(人们常叫这种云为冰雹云)中降下的固态降水物,不同地方的群众称它为雹子、冰蛋、冷子、冷蛋等。各个地方降下的冰雹有大有小,有软有硬,物理特性也有若干差别。在气象上为了统一观测,从某些方面确定了它们的名称和概念。

冰雹:从强烈发展的积雨云中降下且直径在5毫米以上的固态降水物,称为冰雹。冰雹一般较硬,着地可以反跳。冰雹核心常为不透明的冰雹胚胎,核心外由1毫米以上厚度的透明及不透明冰层交替包围组成,它常造成灾害。

软雹:是冰雹的一种,这是一种含有较多液态水量而呈海绵状的雹块,它的结构较松软,着地易碎,常在高纬度地区或高原地带见到,有时爆炸法影响后也出现软雹。由于它的结构松软,造成灾害较小。

冰丸:是指直径为5毫米以下的固态冰球或其它形状冰块,结构较坚硬,落地可以反跳。有人也称为小冰雹。

霰:是指直径为2—5毫米的白色或乳白色的不透明颗粒状固态降水物,结构松软,着地即碎,常呈球形或圆锥形。它有些类似于米雪,但米雪是指直径为1毫米以下的固态降水物。

第二节 冰雹的物理特性

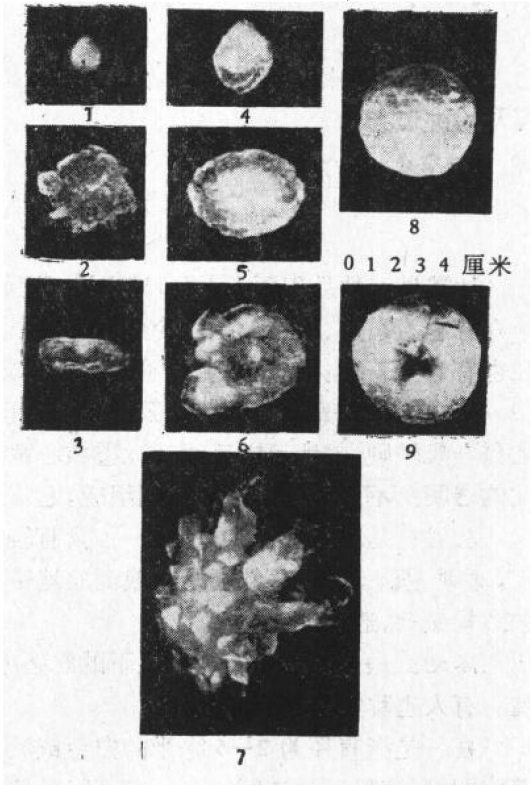
了解冰雹的物理特性有助于我们认识冰雹这一客观降水现象及其形成过程,这对于人工防雹的原理考虑和作业的实施是有实际意义的。

一、冰雹的形状

粗略一看,冰雹的形状似乎简单,但仔细分析,冰雹的形状也相当复杂,这是由于积雨云中冰雹形成过程的复杂性而造成的。图1.1到图1.4几张冰雹实物照片可以给我们一个初步的印象。从这些图片和其它大量观测表明冰雹有以下形状:

球形:图1.1中我们看到一些球状冰雹,图1.3的第8个小图也近乎一个球体。自然界里的确存在着一些球状冰雹,但严格看来,球状冰雹并不太多,往往是呈椭球或扁球状。表1.1列出了加拿大观测的不同形状雹块的百分比,可以看出几个例子中球形冰雹均未超过百分之十。这表明在云中十分对称条件下生长冰雹的概率是较小的。

椭球形：图 1.1 中冰雹多半为各种椭球体，这表明这类冰雹在云中可能是在不断地转动中形成的。一般椭球形又按其长短轴的比值分成长椭球形和扁椭球形。前者和球形较接近，但从表 1.1 看出比例较小；而扁椭球形比例较大，这可能表明这类冰雹在各种条件



影响下,水平方向上易于增长,向上则增长较慢,因而形成扁椭球体。

锥状:图 1.2 是几个典型的锥状冰雹,在小冰雹中常呈如图 1.3 的小图 1 所示形状、或小图 4 的圆锥状。这类冰雹反映了冰雹是在定向下落中形成的。这类滴状冰雹的形成可能与过冷水滴冻结并定向下落有关。表 1.1 表明在某些降雹中这类冰雹比例相当大。

表 1.1 按雹块形状分类的百分比例

时 间	雹块 个数	形状分类					
		扁椭球形	长椭球形	球 形	圆 锥 形	不规则形	其 它
1969 年夏	1920	41	8	10	21	9	11
1969 年 7 月 21 日	92	9	1	5	74	9	2
1969 年 7 月 20 日	252	71	12	6	3	2	6

扁形:从图 1.3 和 1.4 里可以看到象图 1.3 的小图 3 那种扁形(片状和盘状等)冰雹,它可以被视为扁椭球形的极端,反映了在垂直轴向上生长的困难,这可能与空气垂直运动有关。由于冰雹增长环境的复杂性,扁状衍生的中央突出的薄透镜状、中央凹进的圆盘状(图 1.3 小图 9)、片状以及扁状种种变形冰雹(如图 1.3 小图 6)也经常出现。

结晶组合形:图 1.3 的小图 7 就是典型一例,它是由若干个棱锥形冰晶所组成,可以明显看到小图右上角至少有三个棱锥。大冰雹里常见这种类型,这反映了大冰雹增长的复杂性。

多雹块组合形:人们也还发现从空中掉下的雹块有的是由若干小雹块结合而成的,大体有几种情况:1. 由若干小雹块粘合成的冰雹,如图 1.4 右上角那一个葡萄串似的雹块,就是由若干大小接近的小雹块相互粘合而成的;2. 一个大雹块上嵌入了若干小冰雹组成的;3. 两个或多个胚胎形成并逐步溶为一体的冰雹等等。

不规则形状:除了上述各种形状以外,也不时遇到若干不规则形状的冰雹,如图 1.3 和图 1.4 中的某些冰雹就是这样。1974 年 7 月 24 日山西省昔阳县城关附近一次最大尺度达 5 厘米左右的成灾冰雹,不少就是形状不规则的,好些冰雹就象摔碎了的冰块,冰块边缘参差不齐。

以上各种类型的冰雹形状,说明了冰雹生成过程的复杂性。不过一些观测者也注意到冰雹形状和冰雹大小之间也有某些规律性的关系:小冰雹多为球形和锥形,这表明对称增长和定向下落在云中单次生成或较少次数往返生长时较容易达到,所以冰雹尺度就较小;而较大尺度(如 2—3 厘米)的冰雹中椭球体较多,这表明致使冰雹长大的多次往返生长是不利于三维对称增长的,在一定条件下,几次往返增长还可长成椭球体;在更大的冰雹中,不规则形状比例增加,这表明在云中多次往返增长的条件很复杂。

在冰雹形状研究中,人们注意到大冰雹的形状与球状偏离很大,而小冰雹和水滴外形更接近于球形,因此这点已成为近年采用圆偏振雷达识别雹云的一个依据。在其它研究和防雹工作中也注意到这些特点。

二、冰雹的外观

从图 1.1 到图 1.4 几张图上我们可以明显地看到,除了冰雹形状上的差别之外,还有其它外观(如色彩、表面光洁度等)方面的不同,这些特征也从另一方面反映出冰雹增长过程。归纳起来有:

洁净冰:这是一种类似自然纯冰的冰雹,雹内没有气泡,图 1.1 里有个别冰雹是这种类型,冰雹呈无色透明。

透明冰:图 1.1 内有较多的透明冰雹,从外边可以看到雹内层次,有些雹块看上去象剥开蛋壳的松花蛋。这类冰雹外层冰中有少量气泡,但还未影响其透明性能。

乳白色冰:这类冰中有大量小气泡,致使冰雹不透明。内部结构均匀且表面较平滑,呈现出乳白色,图 1.1 里明显可见,其它图中也可看到。

白色冰:冰雹形成过程中混入大量气泡,致使冰雹密度较小,不透明,加之表面粗糙,形成光亮度较差且不透明的冰雹。图 1.2, 图 1.3 和图 1.4 的一部分就是这种冰雹。

粒状冰:冰雹表面由若干粒状冰构成,表面粗糙起伏,结构松软,密度小,常由结霜或粘附小米雪和霰形成。图 1.3 里小图 2, 5, 8 和图 1.4 里相当多的冰雹具有此类冰层。

其次,我们从这些图的外表上可以看到冰雹的表面光洁度也有明显的不同。表面光洁情况可以分成三类:

表面光洁冰:象图 1.1 的各类透明、不透明(乳白色)和洁净冰雹表面都十分光洁,图 1.3 里小图 7 的结晶组合形大冰雹和小图 1, 4 的滴状或圆锥状冰雹也是表面光洁,耀耀闪光。在这类冰雹生长后期,当表面成冰后就没有再与其它降水物粘附并合,所以保持了光洁的冰晶表面。

表面较粗糙:图 1.2, 图 1.3 的 3, 5, 6, 8, 9 等小图和图 1.4 的一些冰雹的表面都比光洁冰雹粗糙,但表面一层的起伏不太大,多为降落过程中粘附若干小冰晶或雪花形成的,所以光洁度较差,常呈白色或乳白色。

表面粗糙:图 1.4 里一些表面蜂窝状似的冰雹,表面极粗糙,色彩灰白,表面多由若干较大冰粒或冰球构成,所以光线反射散乱。这类冰雹常出现于多雹块组合形,与冰雹形成后期的大量粘附大冰晶或小雹块有关。

冰雹外观也部分反映了冰雹生长环境和条件,有人研究指出:温度和含水量与冰晶增长有明显关系。 0°C 附近易形成洁净冰;温度愈低,生成冰晶密度较小,冰晶外观易出现不透明的冰,或出现粒状结构。另外云中含水量较多时,冰晶密度较大,透明度较好,表面较光洁,反之就差些,等等。

三、冰雹的大小

冰雹的大小是我们人工防雹工作中十分关心的问题。大家知道冰雹愈大,末速愈大,造成的损失就愈厉害。另外,积雨云中能落下的最大冰雹直径也反映着云中动力学和冰雹增长的特性,是理论研究的注意点之一。

大家都听说过很多大如拳头、碗口的大冰雹,也听到过击毁房屋、造成人畜伤亡的冰雹事件,甚至有大如车轮、面盆之说,虽然准确记载不多,但说明自然界的确存在着相当大的冰雹。由于特大冰雹罕见而又有相当的意义,因此在今后实际工作中多注意准确记载

特大冰雹是十分必要的。近年来,我国已有记载的特大冰雹有: 1974 年 7 月 1 日在河北省满城县一位农民记下了一个重达 1 斤 6 两(800 克)的大冰雹; 1972 年 5 月初在贵州省贵阳附近遇到一次大冰雹袭击, 击伤若干飞机, 冰雹最大尺度为 20 厘米左右。不过, 国内外虽有不少大冰雹记载, 但以实物为证的资料还不太多。图 1.5 给出了到目前为止拍下实物照片的最大冰雹。这个雹块是结晶组合形的, 最大尺度达 13.8 厘米, 重为 1 斤 7 两(850 克)。此外, 不同地方发现重达 1 斤 4 两和 1 斤 5 两的, 最大周长 44 厘米的大冰雹照片也拍摄出来了。

虽然大冰雹, 尤其是特大冰雹对人们构成威胁, 但它必竟非常罕见。在实际防雷工作中更需要了解的还是一个区域内历次降雹中出现最大冰雹大小的概况。我国一些气象部门根据气象台站的记录, 整理了这种资料, 初步表明我国大部分降落的冰雹直径都在 1—2 厘米以下, 大冰雹, 尤其是特大冰雹出现的机会还是较少的。下边我们先看看新疆的一个统计结果:

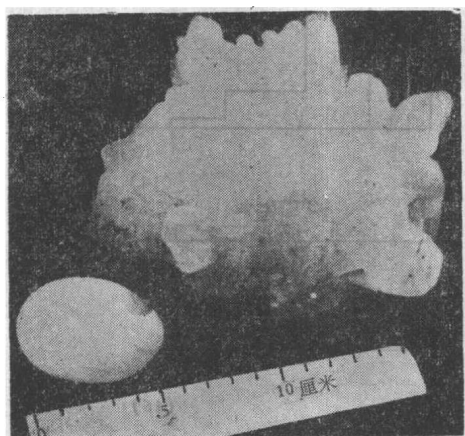


图 1.5 一个大冰雹

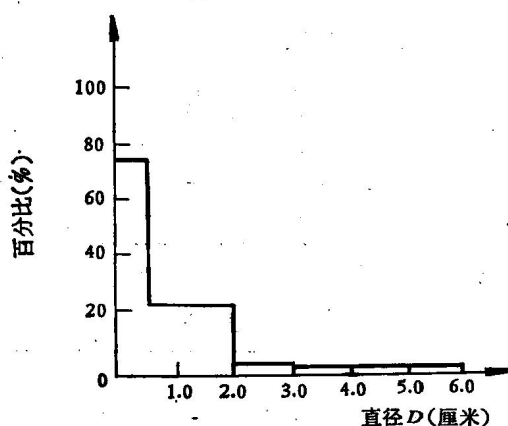


图 1.6 新疆 2126 次降雹最大雹块尺度分布

新疆维吾尔自治区气象局研究所统计了全区 138 个台站的 2126 次降雹记录(1960—1970 年), 资料表明地面降雹最大直径 D 在 0.5 厘米以下的有 1587 次, 占 74.6%; $0.5 \leq D \leq 2.0$ 厘米的为 500 次, 占 23.5%; $2.1 \leq D \leq 5.0$ 厘米的为 21 次, 约占 1.0%; 直径大于 5.0 厘米以上的为 18 次, 仅占 0.9%。图 1.6 是上述结果的图示。可以看到: 新疆地区降雹有 75% 左右是冰丸和霰(直径在 0.5 厘米以下); 98% 是在 2.0 厘米以下的冰雹, 大冰雹和特大冰雹还是相当少的(仅占 2% 以下)。甘肃的资料也表明该省 90% 的降雹是在 2.0 厘米以下。

国外类似的统计资料也表明, 直径小于 2 厘米的冰雹占优势。图 1.7 几个国家的 16 份资料表明了这一点。除了印度之外, 其它各地仅有百分之几到十几的情况降下 2 厘米以上的雹块。这说明世界各地降大冰雹的概率是比较小的。就印度 15 年统计资料来看, 虽说有 22% 的概率出现 3—6 厘米的大冰雹, 但降雹总次数较少, 大概与我国南方降雹类似。世界上的热带和亚热带地区一般降雹较少, 但如果具备降雹条件的话, 则由于水汽充足, 对流旺盛, 垂直气流强, 降下的冰雹常常是比较大的。

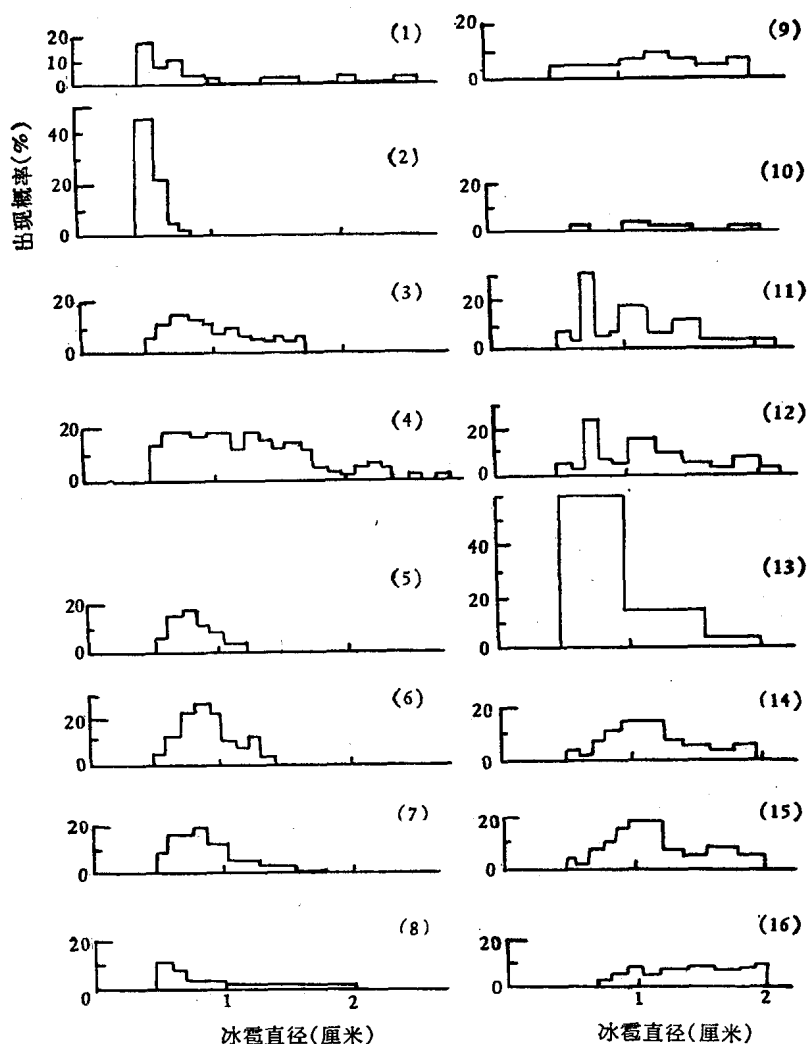


图 1.7 世界上一些地区的降雹尺度分布

图中(1)—(6)为美国的,(7)—(9)为苏联格鲁吉亚的,(10)—(12)为另一人在苏联格鲁吉亚取的,
(13)为法国的,(14)—(16)为第三位著者在格鲁吉亚获取的

四、冰雹的密度

我们知道在自然条件下形成的冰雹远比纯洁的冰块复杂,不但可以混有多少不同的气泡、尘埃和其它悬浮物,有时甚至混有 1—2 厘米大的石头块充作雹核,冰雹剖面中还发现过植物和昆虫,因此冰雹的密度与纯冰密度是有差异的。虽然影响冰雹密度的因子很多,但基本和主要的还是成冰的结构。在自然界这一因素主要与雹云内成冰的环境温度、含水量及冻结速度等条件有关系,这些因子确定了冰雹的结构:是纯冰还是混有气泡,是坚实密集的冰块还是疏松的雪晶粘合,等等。

研究表明,前边所述的各种透明程度的冰态就是反应了冰晶结构的差异,因而密度也就不相同。某些具体观测结果如下:

洁净冰主要在 0—10℃ 区间形成,90% 洁净冰的密度在 0.9 克/厘米³ 左右;接近纯冰;

透明冰主要在 $0 \sim -15^\circ\text{C}$ 范围内形成, 80% 的透明冰密度为 0.85 克/厘米^3 左右, 所含气泡很少;

乳白色冰主要在 $-5 \sim -15^\circ\text{C}$ 内形成, 平均密度约 0.80 克/厘米^3 , 含小气泡很多;

白色冰多在 $-10 \sim -35^\circ\text{C}$ 范围内形成, 平均密度约 0.65 克/厘米^3 , 所含气泡量相当多;

粒状冰多在 $-15 \sim -35^\circ\text{C}$ 区间形成, 密度范围也常在 $0.2 \sim 0.6 \text{ 克/厘米}^3$ 之间(约 80—90%), 表面密度约 $0.3 \sim 0.4 \text{ 克/厘米}^3$ 。

近年来有人分别在四、五个国家收集了共计几百个质量为 0.1 克 到 100 多克 大小不同的冰雹, 这些雹块的密度基本都在 $0.82 \sim 0.92 \text{ 克/厘米}^3$ 之间。对直径约在 1 厘米 以上的冰雹观测表明: 它们结构的主要部分还是由密度较大的洁净冰、透明冰和乳白色冰组成。

更多的观测指出: 冰雹在复杂的降雪过程中可以由几种不同密度的冰构成, 冰雹总的密度是在 $0.3 \sim 0.9 \text{ 克/厘米}^3$, 平均密度常在 $0.7 \sim 0.8 \text{ 克/厘米}^3$, 大冰雹可达 0.9 克/厘米^3 左右, 但软雹和霰的密度就较小。

五、冰雹的末速度

冰雹造成灾害的原因之一是与其急速下降的末速度有关系, 因而了解这一点是必要的。

大家知道下降物体的重力 F_g 与阻力 F_D 相平衡而达到稳定末速度, 对于冰雹

$$F_g = \rho_* V g \quad (1.1)$$

$$F_D = \frac{1}{2} A C_D \rho_{\text{空}} v^2 \quad (1.2)$$

式中 ρ_* 和 $\rho_{\text{空}}$ 分别是冰雹和周围空气的密度, V 和 A 分别是冰雹的体积和垂直下落方向的最大截面积, g 是重力加速度, C_D 是阻力系数, v 是下落末速度。两式相等, 则有

$$v = \left(2 \frac{V \rho_* g}{A \rho_{\text{空}} C_D} \right)^{1/2} \quad (1.3)$$

这是一个普遍的冰雹末速公式, 以下取几类典型形状冰雹, 找出各类关系式。

(1) 球形冰雹 令其半径为 R , 则有

$$v = \left(\frac{8}{3} \frac{\rho_* g}{\rho_{\text{空}} C_D} R \right)^{1/2} \quad (1.4)$$

这里球形的 $\frac{V}{A} = \frac{4}{3} \pi R^3 / \pi R^2 = \frac{4}{3} R$

(2) 椭球形冰雹 令其椭球长短半轴为 a 和 b , 冰雹沿短半轴 b 方向下落, 则

$$\frac{V}{A} = \frac{(4/3) \pi a^2 b}{\pi a^2} = \frac{4}{3} b$$

则有

$$v = \left(\frac{8}{3} \frac{\rho_* g}{\rho_{\text{空}} C_D} b \right)^{1/2} \quad (1.5)$$

(3) 圆锥形冰雹; 令圆锥半径为 R , 锥高为 h , 则

$$\frac{V}{A} = \frac{(1/3) \pi R^2 h}{\pi R^2} = \frac{1}{3} h$$

故

$$v = \left(\frac{2}{3} \frac{\rho_{*}}{\rho_{\text{空}}} \frac{g}{C_D} h \right)^{1/2} \quad (1.6)$$

(4) 扁形冰雹 令它为扁圆柱的一种特例,设半径为 R ,柱高为 H ,但 $H \ll R$,则

$$\frac{V}{A} = \frac{\pi R^2 H}{\pi R^2} = H$$

故

$$v = \left(2 \frac{\rho_{*}}{\rho_{\text{空}}} \frac{g}{C_D} H \right)^{1/2} \quad (1.7)$$

在上述(1.3)到(1.7)几个公式中,除了冰雹体的特征尺寸外,确定冰雹末速的要素有阻力系数 C_D : 这是一个受多因子影响的参量,风洞实验表明 C_D 主要受控于雷诺数,对于一般大小的冰雹,雷诺数在 $10^2 < Re < 10^5$ 范围里,对应阻力系数 C_D 在 0.4—0.5 之间,实验表明球形、锥形冰雹 C_D 在此范围内,其它形状变化大些。然而当雷诺数达 3×10^5 以上时, C_D 则降为 0.1,直接影响了冰雹末速度。

空气密度 $\rho_{\text{空}}$: 不同高度上空气密度不同,根据状态方程 $P = \rho RT$,则有

$$\rho_{\text{空}} = \rho_0 \frac{PT_0}{P_0 T} \quad (1.8)$$

可以确定任一高度的末速度,式中 P_0 , P 分别是地面和空中的气压, T_0 和 T 分别是地面和空中的温度, ρ_0 是地面空气密度。一般我们求达到地面的末速度,所以直接用 ρ_0 代入上述关系式。

冰雹密度 ρ_{*} : 上边已经讲过, ρ_{*} 变化于 0.3—0.9 克/厘米³ 之间,计算 v 时根据降雹性质或直接观测来确定 ρ_{*} 。

不少作者已根据上述关系计算了冰雹末速度,不过往往由于各自假定条件的不同而有差别。下边举出两种结果:

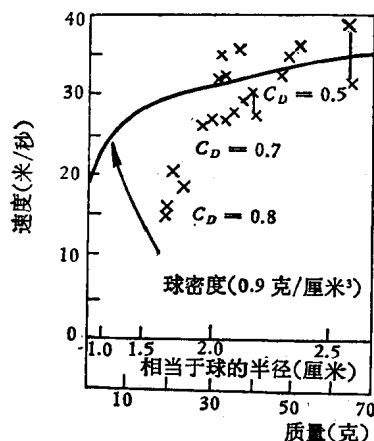


图 1.8 冰雹下落末速度

图 1.8 给出了直径 5 厘米以下的球形冰雹的下落末速,这里假定是: $C_D = 0.45$ (取光滑的球状冰雹的 C_D 值), $\rho_{*} = 0.9$ 克/厘米³, $\rho_{\text{空}} = 1.15 \times 10^{-3}$ 克/厘米³。在此图中为了帮助了解阻力系数 C_D 情况,给出了部分实测值,它主要取决于雷诺数及物体形状,可以看到在直径 5 厘米以下的球状冰雹 C_D 多在 0.8—0.45 范围之内。从此图可以看出球形冰雹几个常见尺度的大小、质量和末速度的关系,比如直径 2 厘米的球状冰雹,质量约为 3.8 克,末速约为 20 米/秒。

表 1.2 里,给出了按照球形冰雹公式(1.4)式,选用不同 ρ_{*} 计算的降至地面附近的冰雹直径、质量和末速的关系,它可以粗略地给我们提供它们之间的关系。

比如直径 0.4 厘米的冰丸仅重 0.027 克,落速约 8 米/秒,可以估计它的危害较小;而直径 3 厘米的冰雹,质量约 12.7 克,其末速达 25 米/秒左右,可见已有相当危害性了;大至直径 10 厘米的大冰雹,重约 471 克(约 9 两半),末速为 45 米/秒左右,它可以造成很大损害。当然,由于实际冰雹结构的复杂,密度的不同,以及种种因素造成 C_D 值的变化,所以上述图表只能提供球状冰雹的大致情况。