

# 人工防雹实用技术

王雨增 李凤声 伏传林 编著



气象出版社

# 人工防雹实用技术

王雨增 李凤声 伏传林 编著

气象出版社

(京)新登字046号

## 内 容 简 介

本书较全面地介绍了人工防雹的基础知识和各项应用技术,阐述了冰雹、冰雹云、降雹的先兆特征等基础知识;作为冰雹灾害和效果检验依据的冰雹落地动能,本书在国内做了首次系统的介绍。有关防雹的原理与技术,本书汇集了作者多年实践经验并在总国内有关科学工作者实践经验的基础上,提出了雷达连续跟踪、用弹量计算公式和雷达直接指挥炮点作业的方法以及防雹效果检验的物理统计方法。书中还介绍了高炮人工增雨的作业技术方法;高炮作业指挥系统;国外防雹试验情况。

本书把基本理论与应用技术紧密结合,科学性、实用性较强,可供从事防雹作业有关人员、科学技术和研究人员使用参考,以及各地防雹培训班学员和大专院校大气物理专业师生参考。

## 人工防雹实用技术

王雨增 李凤声 伏传林 编著

责任编辑:苏振生 终审:周诗健

封面设计:曾金星 责任技编:苏振生 责任校对:王郁乐

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号 邮编100081)

北京市燕山联营印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

开本:787×1092 1/16 印张:10.75 字数:270.4千字

1994年10月第一版

1994年10月第一次印刷

印数 1—1500

ISBN 7-5029-1856-6/P·0722

定价:15.00元

## 序 言

冰雹是威胁人类生产、生活的严重自然灾害之一，人类很早就设想用各种方法防雹。自1946年以来，世界各国逐渐用更有科学根据的方法进行防雹。我国从1958年开始逐渐开展科学的人工防雹试验研究。数十年来，在世界各国包括我国科学家们的努力下，在理论和实践方面都取得了相当大的进展，积累了丰富的经验，这项工作正在深入的发展中。

本书作者都是长期从事第一线防雹试验研究的同志。他们结合我国实际，吸取国内外先进经验与理论，通过观测实践积累了丰富的经验。本书即是在此基础上写成的。书中第一—四章为冰雹的基础知识，其中第三章冰雹落地动能为新内容，是客观衡量冰雹强度的物理量，可作为衡量冰雹灾害及检验防雹效果的依据，近年来很受各国重视。本章是作者吸取意大利、瑞士、法国在防雹试验中使用的方法加以改进后在河北满城、山东德州试验结果的基础上写成的，在我国是首次系统的介绍，并有所创新；第五—十章是有关防雹原理及技术，汇集了国内及作者多年实践中总结出的经验，提出了三个重要的问题及其解决的途径：（1）由于雹云发展变化很快，强中心位置不固定，要想有效地指挥作业，取得明显的作业效果，雷达必须连续跟踪观测，作业指挥人员一定要随时在雷达荧光屏上监视雹云强中心的位置及其移动变化，直接指挥炮点作业，减少中间环节，才能减少作业的盲目性；（2）人工防雹效果的检验与评估是防雹中最复杂、最困难的问题之一，多年来国内外多采用以灾情为主的数学统计方法。由于这个方法只考虑最后结果，而不管造成这种结果的云变化过程，难以深入开展冰雹形成机制和效果检验的研究。为了提高效果检验的可信度，作者把效果检验与降雹特征和造成降雹的云变化特征联系起来，采用物理意义明确的物理参量作为效果统计的检验量（如冰雹落地动能，雷达回波强中心顶高等）的物理统计检验方法。这种检验结果更有说服力，使效果检验方法向前迈进了一步；（3）高炮作业用弹量，目前大都只凭估计，心中无数，本书根据上升气流模式计算云中含水量，以落地冰雹是否成灾为界，提出了新的用弹量计算公式，为减少或避免炮手只凭经验作业提供了方法和依据；第十一章是介绍高炮人工增雨的原理及技术，使防雹系统同时发挥人工增雨的作用，最后一章介绍国外试验情况，很值得参考借鉴。

人工防雹是一项复杂而又技术难度大、涉及面广的科学试验研究工作，其基础理论，催化技术、探测手段等许多重要问题都有待在实践中探索、研究解决。

我国人工影响天气工作正在不断前进，防雹的科研工作正在受到重视，我相信这本书有助于防雹试验研究工作更好地发展。

该书主要作者曾参加意大利、瑞士、法国和我国山东（德州、济阳）、河北（满城、张家口、遵化）、云南（鹤庆）河南（商丘）等地防雹试验，1993年曾赴泰国指导该国高炮人工增雨试验，有较丰富的实践经验和理论基础。

易仕明

1994年1月30日

# 目 录

## 序言

## 第一章 冰雹..... ( 1 )

§ 1 冰雹的危害 ..... ( 1 )

§ 2 冰雹的概念 ..... ( 2 )

§ 3 冰雹的大小 ..... ( 2 )

§ 4 冰雹的物理特性 ..... ( 3 )

§ 5 冰雹的融化 ..... ( 9 )

## 第二章 冰雹云..... ( 12 )

§ 1 冰雹云类型 ..... ( 12 )

§ 2 大气层结稳定度 ..... ( 20 )

§ 3 冰雹云形成的特殊条件 ..... ( 22 )

§ 4 冰雹云形成的演变过程 ..... ( 26 )

§ 5 冰雹云的宏观特征 ..... ( 26 )

## 第三章 落地冰雹动能..... ( 31 )

§ 1 冰雹下落末速度 ..... ( 31 )

§ 2 落地冰雹动能 ..... ( 35 )

§ 3 冰雹动能通量与质量通量 ..... ( 39 )

§ 4 冰雹动能通量与雷达反射率 ..... ( 42 )

§ 5 作物受损程度的计算方法 ..... ( 43 )

## 第四章 降雪的先兆特征..... ( 45 )

§ 1 冰雹云的识别 ..... ( 45 )

§ 2 雹云回波的先兆现象 ..... ( 52 )

§ 3 雹云闪电增长的先兆特征 ..... ( 56 )

§ 4 冰雹天气过程的先兆阶段 ..... ( 58 )

§ 5 分析与讨论 ..... ( 58 )

## 第五章 人工防雹的基本原理..... ( 59 )

§ 1 成冰催化剂 ..... ( 59 )

§ 2 催化防雹的理论基础 ..... ( 61 )

§ 3 爆炸影响冰雹云 ..... ( 63 )

§ 4 人造下沉气流影响对流云 ..... ( 65 )

## 第六章 高炮作业技术..... ( 66 )

§ 1 基本原理 ..... ( 66 )

§ 2 雷达指挥下的作业技术 ..... ( 66 )

§ 3 宏观作业技术 ..... ( 71 )

§ 4 作业时机 ..... ( 72 )

§ 5 作业部位 ..... ( 73 )

|             |                        |               |
|-------------|------------------------|---------------|
| § 6         | 作业流程 .....             | ( 73 )        |
| <b>第七章</b>  | <b>用弹量的计算方法 .....</b>  | <b>( 76 )</b> |
| § 1         | 雹源体积的确定 .....          | ( 76 )        |
| § 2         | 碘化银的成活率 .....          | ( 76 )        |
| § 3         | 雹源含水量的计算 .....         | ( 76 )        |
| § 4         | 用弹量的计算 .....           | ( 77 )        |
| § 5         | 冰雹(晶)增长速率概量模式 .....    | ( 81 )        |
| <b>第八章</b>  | <b>防雹效果的评估方法 .....</b> | <b>( 88 )</b> |
| § 1         | 序列试验 .....             | ( 88 )        |
| § 2         | 区域回归试验 .....           | ( 89 )        |
| § 3         | 随机试验 .....             | ( 95 )        |
| § 4         | 雷达回波参量对比法 .....        | ( 95 )        |
| § 5         | 双重因子估计法 .....          | ( 98 )        |
| § 6         | 落地冰雹动能法 .....          | ( 98 )        |
| <b>第九章</b>  | <b>雹、雨观测分析方法 .....</b> | <b>(105)</b>  |
| § 1         | 冰雹谱分布的观测分析 .....       | (105)         |
| § 2         | 雨滴谱观测分析 .....          | (108)         |
| § 3         | 冰雹微结构的切片分析 .....       | (112)         |
| § 4         | 同位素分析 .....            | (115)         |
| § 5         | 银含量的化学分析 .....         | (119)         |
| § 6         | 摄影在防雹中的应用 .....        | (122)         |
| <b>第十章</b>  | <b>防雹作业指挥系统 .....</b>  | <b>(126)</b>  |
| § 1         | 冰雹预报 .....             | (126)         |
| § 2         | 冰雹天气的监测 .....          | (128)         |
| § 3         | 信息传输 .....             | (130)         |
| § 4         | 资料实时处理 .....           | (131)         |
| § 5         | 决策指挥 .....             | (131)         |
| <b>第十一章</b> | <b>高炮增雨作业技术 .....</b>  | <b>(134)</b>  |
| § 1         | 概况 .....               | (134)         |
| § 2         | 人工增雨试验的必要性 .....       | (136)         |
| § 3         | 云的宏观特征 .....           | (137)         |
| § 4         | 自然降水的形成 .....          | (140)         |
| § 5         | 人工增雨的基本原理 .....        | (141)         |
| § 6         | 人工增雨的云层条件 .....        | (142)         |
| § 7         | 天气条件的选择 .....          | (144)         |
| § 8         | 高炮增雨作业技术方法 .....       | (145)         |
| <b>第十二章</b> | <b>国外防雹试验概况 .....</b>  | <b>(148)</b>  |
| § 1         | 前苏联防雹情况 .....          | (148)         |
| § 2         | 希腊国家防雹计划及实施 .....      | (152)         |
| § 3         | 保加利亚防雹试验 .....         | (154)         |

|     |                 |       |
|-----|-----------------|-------|
| § 4 | 西班牙人工防雹 .....   | (153) |
| § 5 | 联邦德国防雹 .....    | (155) |
| § 6 | 南斯拉夫的防雹体系 ..... | (156) |
| § 7 | 三国联合试验 .....    | (157) |
| § 8 | 意大利人工防雹 .....   | (158) |
| § 9 | 美国防雹试验 .....    | (159) |

# 第一章 冰 雹

冰雹是世界上很多地方经常出现的一种自然灾害，它对人类的危害很大。人类只有了解冰雹的特征，弄清楚冰雹在云中是怎样形成的，才能设法抑制冰雹的形成，减轻冰雹的危害。

## §1 冰雹的危害

一场急剧而强烈的降雹过程，可能对农业、工业、交通、通信以及城市建筑等造成严重的危害和损失，特别是在农作物快到成熟、收割的季节，突如其来的一场冰雹，可摧毁大片庄稼(有时数百万亩农作物受灾，重则颗粒无收，轻则减产)。如：

(1) 1985年7月2日河北保定地区，20分钟内，涿县、唐县、清苑、满城、博野等11个县市，纵横数百里，冰雹平均半尺多厚，无数庄稼被夷为平地，数千棵树的叶子被砸光，许多门窗、玻璃被砸碎，房屋被砸塌。保定市区马路成河，雨水上漂浮着冰雹缓缓移动，堵塞着地道桥孔，造成交通中断，全市停电停水，京广铁路停运，瞬时气温急剧下降到 $-13^{\circ}\text{C}$ 。这场冰雹，给保定地区造成数亿元的损失。

(2) 1988年5月2日晚17时30分至午夜24时左右，河南商丘地区全境连续3次遭到了历史上罕见的冰雹、暴雨、龙卷风的严重袭击。冰雹外形各异、有棱形、鸭蛋形、圆球形、铁饼形；屋顶被冰雹砸得满是窟窿，树木砸得象刮了皮的光秃秃的木桩。

全区134个乡镇受灾严重，其中重灾乡42个；受灾村2239个，受灾人口289.3万人。受灾面积279.3万亩，成灾面积228.3万亩。100多万亩小麦绝收，减产2亿5千8百万公斤；油菜减产3千4百8拾万公斤；砸坏棉花25.9万亩；烟叶7.4万公斤。砸伤1179人，死8人。死伤牲畜2932头，经济损失5亿元以上。

(3) 1990年6月22日午夜至23日凌晨，一次强雹暴袭击山东省西北部6个县市，降下的冰雹，直径最大为5厘米，积雹厚度为3厘米，单站降雹持续时间10—15分钟，雹击宽度5—10公里，雹径长度70—100公里，地面冰雹数密度最大为3024个/米<sup>2</sup>，(根据无铅箔测雹板测得)最大冰雹动能382.5焦耳/米<sup>2</sup>，降雹强度0.425公斤/米<sup>2</sup>·秒。降雹时伴有10级以上大风和暴雨，造成78万亩农田受灾，其中重灾面积为64万亩，倒折树8万余棵，刮倒电线杆127根，损坏房屋300余间、经济损失近亿元。

翻开我国的地方志，会使人大吃一惊。据记载，从公元999年(北宋咸平二年)至今，仅河北保定地区受到大冰雹的袭击达28次之多。1636年(明崇祯九年)，降下的冰雹象烙饼大，容城、定兴等地人畜伤亡惨重；1659年(清顺治六年)农历5月降雹大如馒头，人畜死伤甚多。

各地历史资料表明，我国是一个多雹灾的国家，每年都有不同程度的冰雹灾害。据不完全统计，我国遭受风雹灾的农田，每年在3600万亩以上，重灾年超过6000万亩，严重影响农业生产和人民生命财产的安全。

从国外资料也可以看出，冰雹造成的危害也相当严重。前苏联、美国以及欧洲各国每年因冰雹造成的损失达数亿美元，甚至几十亿美元。

冰雹的危害程度与冰雹大小、数密度、降雹持续时间有关。降雹所伴随的大风暴雨，造

成的危害就更为严重。

冰雹的大小与数密度是造成冰雹危害的两个主要因子。豌豆大小的小冰雹（直径5毫米左右），一般不易使作物受灾；如果冰雹硬度大，数密度也大（即大于5767个/米<sup>2</sup>），会造成一定灾害；直径7毫米左右的硬雹连续降2分钟，可使葡萄减产；若直径为15毫米，每平方米面积上只落下71个冰雹，就能造成灾害；如果冰雹直径在3厘米以上，降落速度达25米/秒，（相当于时速90公里）能直接摧毁车辆，飞机，造成人畜伤亡。

## §2 冰雹的概念

冰雹是从冰雹云中降下来的固态降水物。各地对它有許多习惯性的叫法，如雹子、冷子、冰蛋、冷蛋子等。在气象学上，冰雹有广义和狭义的内容。从广义上说，它包括冰雹、冰粒、和霰，按气象观测规范中的定义（即狭义），冰雹专指直径在5毫米以上的固态降水物。

冰雹、冰粒和霰都是固态降水物，它们关系密切，有时不易区分，但它们的物理特性和对农作物以及人类活动的影响各不相同。为了统一观测，须加以区分。

霰：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，落地易碎，一般呈球形或圆锥形，它有些象米雪，但米雪直径在1毫米以下。

冰丸：直径为5毫米以下的固态冰球或不规则形冰块，结构比霰坚硬，着地能反跳，有人称它为小冰雹。

软雹：含有较多液态水的海绵状雹块，也称为海绵雹。其特点是结构松软，着地易铺开或破碎，不易反跳。在高原地带或较高纬度地区常见到这种降水物。有时用爆炸法影响雹云后，也出现软雹。

冰雹：从强烈发展的冰雹云中降下，且直径在5毫米以上的固态降水物。冰雹一般较硬，着地可以反跳，不易压碎。它常有一个明显的核（有时也有双核、多核），一般由霰或透明的冻结水滴构成，称为冰雹胚胎。每个冰雹一般由透明与不透明的冰层（每层至少1毫米厚）交替包围组成。

我国西北、西南以及华北等地冰雹发生比较频繁，特别是春夏之交的过渡季节降雹更多，冰雹多呈以霰或冻滴为核心的多层次结构（见图1.1），形状多样（见表1.2）。

## §3 冰雹的大小

冰雹的大小是人们十分关心的问题之一。冰雹愈大，末速度愈大，造成的危害也愈厉害。落地冰雹愈大，在云内0℃层高度上的冰雹也就愈大，对它的影响就更困难。

1987年6月29日在河北满城县高士庄—北台渔一次降雹过程中取得182个冰雹，其大小分布见表1.1。

表 1.1 冰雹直径

| 直径D(毫米) | 3—7  | 8—11 | 12—15 | 16—19 | 20—23 | 24—27 | 28—31 | 36  |
|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| 数量(个)   | 78   | 42   | 24    | 15    | 13    | 5     | 4     | 1   |
| 百分比(%)  | 42.9 | 23.1 | 13.2  | 8.2   | 7.1   | 2.8   | 2.2   | 0.5 |

由表1.1可看出，直径 $D \leq 15$ 毫米的冰雹较多，占79.2%， $D \geq 28$ 毫米的占2.7%，最大冰雹直径（长轴）只有一个（36毫米）。

1980年7月河北万全县郭磊庄两次降雹，在484个冰雹样品中，最大冰雹直径(长轴)26毫米，最小4毫米，直径 $D \leq 5$ 毫米的冰雹占45.7%， $5 < D < 20$ 毫米的占49.6%， $D \geq 20$ 毫米的只占4.7%。

我国一些气象台站观测到的冰雹，绝大多数都是尺度小，大部分冰雹直径在2厘米以下。根据新疆138个台站2126次降雹记录统计，最大冰雹直径在5毫米以下的占74.6%，在2厘米以下的占98%；河北满城县1986—1989年39次降雹过程中，93%以上的冰雹直径都在2厘米以下；甘肃90%的降雹，直径不超过2厘米；河北张家口气象台站观测得出，6月份该地区降雹次数虽多，但颗粒不大，冰雹尺度大于5毫米的降雹次数仅占全部降雹次数的19.6%，7月份占的百分比最大，达到37.1%，从该区各月降雹百分比看出，60%以上的降雹都是小于5毫米的小冰粒。

对北京、天津、内蒙古等地资料分析表明，大部分冰雹颗粒都很小，直径一般在5—30毫米，重量在0.1—12.72克，重量在13克以上的较为少见。但在人们的传说中，常听到很多如拳头大、馒头大的冰雹，造成人畜伤亡的事件也不稀罕。特大的冰雹传说虽然很多，但有实物照片的，到目前为止，只有750克，最大围长44厘米；也有重850克，最大尺度为13.8厘米的冰雹。

从欧、美各国报道来看，直径在10厘米、重量在500克以上的冰雹也不少。

1970年9月3日在美国堪萨斯东南部观测到一个766克重、围长44厘米、等效直径为11.5厘米，体积约为800立方厘米的冰雹。更为罕见的是前苏联出现了一个重量约10公斤<sup>[1]</sup>、直径为30厘米以上的特大冰雹。降雹时将一个铺有7层芦苇的屋顶击穿，如此大的冰雹，从世界降雹史上看也是极少见的。

## §4 冰雹的物理特性

### 1. 冰雹的形状

冰雹有各种各样的形状。根据我国山东、河北和加拿大阿尔伯塔等地降雹资料分类表明，基本上分为球形、圆锥形、椭球形和不规则形见表1.2。

表 1.2 冰雹按形状分类的百分比

| 出现地区      | 时间        | 形状     |      |      |      | 样品总数 |
|-----------|-----------|--------|------|------|------|------|
|           |           | 百分比(%) | 球形   | 椭球形  | 圆锥形  | 不规则形 |
| 德州(山东)    | 1988.8.7  | 60.2   | 26.7 | 5.8  | 7.3  | 206  |
|           | 1990.6.23 | 13.5   | 70.8 | 4.5  | 11.2 | 89   |
| 满城(河北)    | 1987.6.29 | 29.7   | 55.5 | 2.2  | 12.6 | 182  |
|           | 1990.5.25 | 76.1   | 12.0 | 8.9  | 3.0  | 259  |
| 万全(河北)    | 1980.7.20 | 21.4   | 58.3 | 3.8  | 18.5 | 449  |
|           | 1980.8.22 | 8.6    | 20.0 | 62.9 | 8.5  | 35   |
| 昭苏(新疆)    | 1980.7.28 | 27.0   | 30.0 | 39.0 | 4.0  | 111  |
|           | 1982.6.5  | 53.9   | 12.5 | 16.4 | 17.2 | 1012 |
| 阿尔伯塔(加拿大) | 1969.7.12 | 5.0    | 10.0 | 74.0 | 11.0 | 92   |
|           | 1969.7.20 | 6.0    | 83.0 | 3.0  | 8.0  | 252  |

从表1.2看出,1980年7月20日和1987年6月29日取得的冰雹样品中,以椭圆形冰雹最多主要是一些不透明的冰雹,最大的冰雹(长轴)3.6厘米。1980年8月22日<sup>[2]</sup>的冰雹以圆锥形为主,锥顶稍圆,锥底为半球,冰雹表面粗糙,色彩灰白,而1980年7月20日和1987年6月29日<sup>[3]</sup>的冰雹则没有这种情况,其表面比较光滑。

在实际分类中,不属于上述三种形状的都归入不规则形,如馒头形、长条形、盘形和柱形等,有的冰雹象摔碎了的冰块,边沿参差不齐。

一些观测资料表明,冰雹形状与冰雹大小有某些规律性的关系,小冰雹多为球形和圆锥形;较大尺度(如2厘米以上)的冰雹中椭圆形冰雹较多。

## 2. 冰雹的外观

人们在研究冰雹的物理特征时,除了注意冰雹在形状上的差异外,还看到它的色彩、表面光洁度等方面差别较大,基本上可分为:

(1) 明净冰:雹内没有空气,无色透明,密度约为0.92克/厘米<sup>3</sup>,生长的环境温度在0—-5℃。

(2) 透明冰:只含有少量的较大的气泡,从外边可看到冰雹内部的层次和胚胎,其密度约为0.85克/厘米<sup>3</sup>,环境温度比-5℃略低,这种冰不易与明净冰分辨清楚。

(3) 乳白色冰:含有大量气泡,不透明,内部结构均匀,表面平滑,呈乳白色,密度约为0.8克/厘米<sup>3</sup>。

(4) 白色冰:在冰雹形成过程中混入大量气泡,密度较小,约为0.65克/厘米<sup>3</sup>,不透明,表面粗糙,光洁度较差的白色冰雹,生长的环境温度为-5~-15℃。

(5) 粒状冰:冰雹外表由一些小颗粒(如米雪、霰形成)构成,结构松软,表面比光洁冰雹粗糙,密度更小,在0.2—0.6克/厘米<sup>3</sup>。

冰雹的色彩和光洁度部分反映了冰雹生长的环境条件。有人指出,0℃附近易形成明净冰,温度愈低,生长的冰晶密度较小,外观易出现不透明或粒状结构。云中含水量越多,冰晶密度较大,透明度较好,表面光洁度也好,反之,较差。

## 3. 冰雹胚胎

从冰雹切片中可清楚辨别冰雹有一个核心,这个核心称为冰雹胚胎,冰雹总是围绕这个核心而增长的。

根据河北、宁夏等地的冰雹资料的统计结果,胚胎基本上分为球形、椭圆形和圆锥形,也有的是苹果状和椭圆状的双核或多核,但多数冰雹只有一个核心。

冰雹胚胎的形状与冰雹最终的形状有一定关系。美国奈特的观测资料表明,球形胚胎有75%。最后形成球状雹块,而圆锥形或卵形胚胎则有66%形成椭圆形冰雹。

冰雹胚胎基本上由霰或冻结水滴充当(见表1.3),但也发现有植物、昆虫残余或小石块作核心的,冰雹胚胎直径一般为几毫米。

冰雹胚胎的性质与冰雹大小有一定关系,冻结水滴作为胚胎,大冰雹多,霰或软雹作胚胎时,冰雹偏小。美国在四个地方,83次降雹过程中搜集的1380个冰雹的统计结果表明,冰雹愈小,以霰或软雹作为胚胎的越多;冰雹愈大时,则以冻结水滴为胚胎的比例较大,如大于7.1厘米的冰雹中就占了63%。

## 4. 冰雹的层次与结构

冰雹并非完全由纯水构成,常混有气泡、液态水和其它物质,因而造成密度、透明度和光洁程度等方面的差别。

表 1.3 各地冰雹胚胎性质分类统计表

| 地 区       | 样品总数(个) | 霰胚(%) | 冻胚(%) | 其它(%) | 冰雹最大尺度<br>(cm) |
|-----------|---------|-------|-------|-------|----------------|
| 满城(河北)    | 843     | 30.6  | 67.4  | 2.0   | $D < 3.6$      |
| 昭苏(新疆)    | 999     | 49    | 51    |       | $D < 2.8$      |
| 德州(山东)    | 71      | 47.9  | 45.1  | 7.0   | $D \leq 2.5$   |
| 阿尔伯塔(加拿大) | 1610    | 72    | 20    |       | $D \leq 2.5$   |
| 科州东北部(美国) | 2306    | 86    | 8     | 6.0   | $D \leq 2.5$   |
| 俄克拉何马(美国) | 752     | 18    | 58    |       | $D < 2.5$      |
| 中西部(美国)   | 54      | 41    | 44    |       | $D < 2.5$      |
| 瑞士        | 341     | 51    | 42    |       | $D < 2.5$      |
| 南非        | 960     | 29    | 54    |       | $D < 2.5$      |

### (1) 冰雹的层次

从冰雹切片的照片上能够看出,在胚胎的外围由一些透明层和不透明层交替组成。若根据透明程度的分层,到目前为止,世界上已观测到的冰雹最多达28层乃至30层。一般来讲,冰雹愈大,层次愈多。Carte和Kidder对673个冰雹按其直径1—3厘米、3—5厘米和大于5厘米分为中、大和特大三类冰雹。统计结果表明,中等冰雹以2—5层最多,大冰雹以4—6层最多,特大冰雹以9—15层居多。在特大冰雹中有30%为10—20层,其中一个冰雹的层次达28层。

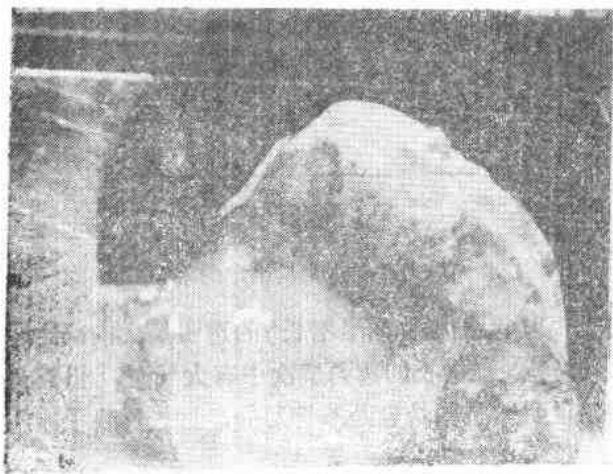


图 1.1 冰雹在自然光下的切片

拍摄地点:河北满城县

时间:1987年6月29日

从我国观测到的冰雹层次来看,甘肃岷县的冰雹最多有10层,甘肃平凉(1977年6月25日)最多达16层。从一次降雪过程中获得的冰雹资料分析,并非冰雹愈大,层次愈多,如1987年6月29日河北满城县一个直径为3.6厘米的冰雹只有3层见图1.1。从我国各地观测资料统计得到,大多数冰雹层次为3—9层,见图1.2。

若根据冰晶的大小发生明显变化来确定层次,冰晶结构有明显变化时,透明度必有相应的变化。但反过来透明度有变化时,冰晶结构却未必有变化。因此按冰晶结构所得到的层次总是小于(或等于,但极少超过)按气泡特点所得到的层次。在上述673个冰雹样品中按冰晶结构得到的,层次最多的只有8层。从图1.3来看,随着冰雹的增大而层数增多,这种增多情况要比按气泡分层的分布情况较规律些;它们最集中的层次分别为2、3、4层,最集中的程度都在35%以上,没有特别分散的现象,这种情况也许说明按冰晶特点来分层的办法比较合理。

### (2) 冰雹的结构

从自然光下拍摄的冰雹切片照片看出,干增长<sup>1)</sup>的不透明层是由若干不同色彩的小块组

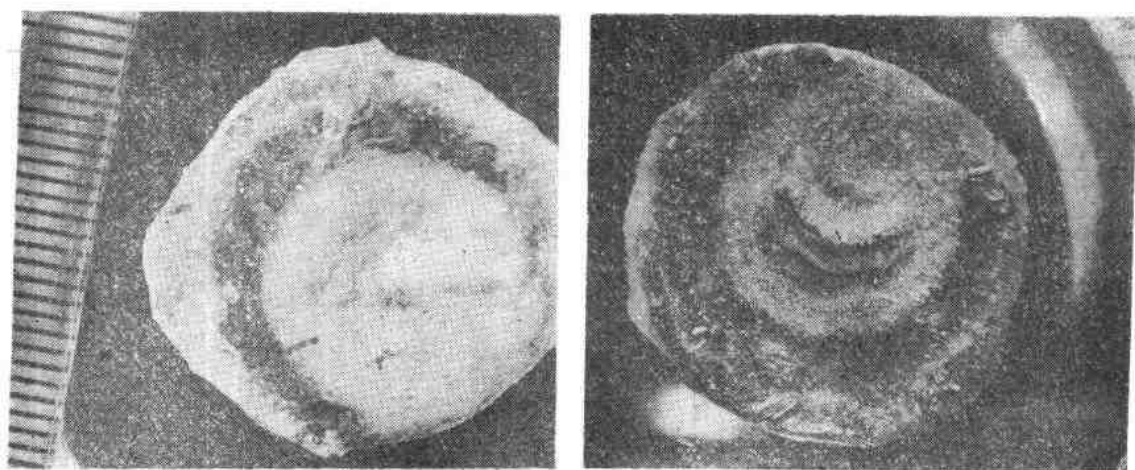


图1.2 (a、b) 在自然光下的冰雹切片  
(a) 5层 (b) 9层

拍摄地点：山东德州  
时间：1988年9月7日

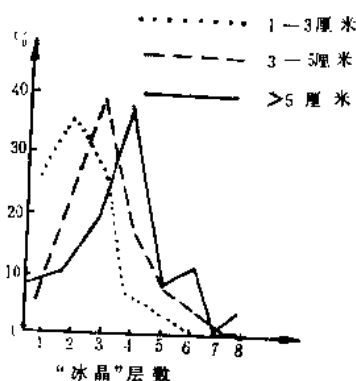


图 1.3 按冰晶结构确定的冰雹层次分布

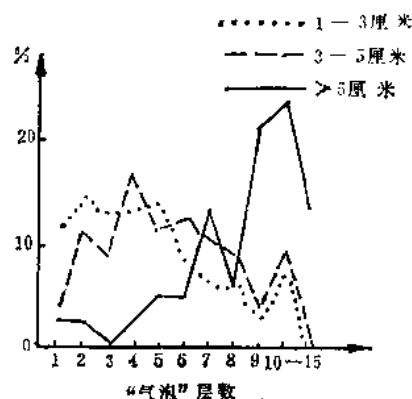


图 1.4 按气泡结构确定的冰雹层次分布

成，其间有空隙。小块的排列是沿半径方向呈辐射状结构，而湿增长<sup>2)</sup>的透明层次内部比较均匀。干、湿增长层界线基本清晰，但也有渗透。湿增长的透明层次中有大气泡，但数量少，不影响透明度。由于冰雹的分层不均匀，说明冰雹增长也是不均匀的，这些反映了冰雹增长的某些微物理特点。

从偏振光冰雹切片照片(见图1.5—1.6)中可以看到，各层冰晶几乎都是沿径向排列成辐射状或瓣状结构。干增长层晶体较小，湿增长层晶体较大，这可能与它们形成的机制有关。过冷水滴或冰晶融后重新冻结容易形成大晶体，干增长层与冰雹在云中直接捕获的冰晶或过冷水滴大小有关。

1) 干增长：云内含水量较低，气温也很低，在冰雹形成过程中原来在水中溶解的空气或水滴之间存在的空气来不及逸散，冻结形成含有大量气泡的不透明冰层。

不透明冰层反映云内含水量小，气温低的生长条件，这种生长条件的增长过程叫干增长。

2) 湿增长：由于云内含水量充沛，气温高，在冰雹形成过程中捕获大量过冷水滴同时在冻结中释放大量的潜热，其一部分热量消耗在冰雹的蒸发和空气的热传导上，另一部分热量则用来提高冰雹的温度，从而使雹体四周形成一层水膜，慢慢冻结形成不带气泡或带有少量大气泡的透明冰层。

云内含水量充沛，气温高的生长条件的增长过程叫湿增长。

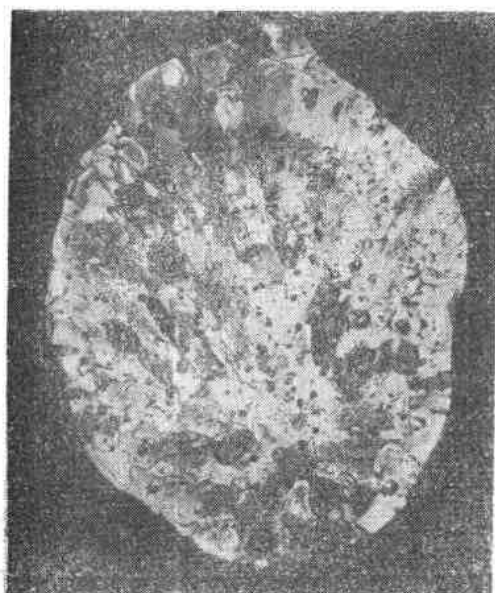


图 1.5 正交偏振片间雹切片照片  
主长轴：19.5毫米，短轴：15毫米  
片厚：0.3毫米，晶体峰值尺度：1.6毫米

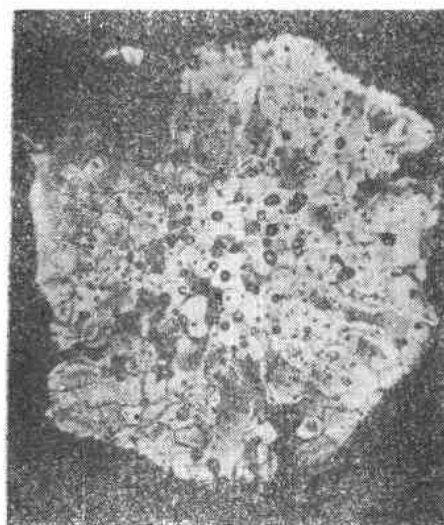


图 1.6 正交偏振片间雹切片照片  
圆形雹块直径：17.4毫米  
晶体峰值尺度：1.5毫米

### (3) 冰雹的气泡分布

雹块的气泡分布与环境温度、冰雹尺度以及云滴大小等因子有关，研究雹块的气泡特征及其分布有助于推算雹块生长的环境温度和表面温度。

#### (a) 气泡的形状

List等人在仔细研究了雹切片后，发现气泡有各种各样的形状，有球形、柱形、椭球形以及各种复杂的形状。

从满城等地雹切片看出，气泡有球形、椭球形以及不规则等形状，小气泡多呈球形，大气泡多呈扁球形。在较大气泡内常发现少量白色的不透明的冰粒(见图1.7)。

#### (b) 气泡大小与数密度

Carte和Maklin等人认为，气泡的数密度和大小依赖于许多因素，如冻结速率、空气的溶解量、气泡的逃逸和水的运动情况等。List、Browning等人发现气泡的大小很不一样，小至超显微，大至数毫米。

表 1.4 雹块的气泡特征表

| 地区      | 气泡峰值直径或<br>平均直径( $\mu\text{m}$ ) | 气泡最大尺度<br>( $\mu\text{m}$ ) | 气泡面密度<br>( $\uparrow/\text{cm}^2$ ) | 气泡体密度<br>( $\uparrow/\text{cm}^3$ )     | 样本数 |
|---------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|-----|
| 满城(河北)  | 24—39                            | 700                         | 630—66000                           | $4 \times 10^4$ — $2.2 \times 10^7$     | 84  |
| 昭苏(新疆)  | 54—59                            | 400                         | 1319—4489                           | $1.09 \times 10^3$ — $4.65 \times 10^5$ | 77  |
| 张家口(河北) | 50                               |                             |                                     | $1 \times 10^4$ — $65 \times 10^5$      | 12  |

从表1.4看出，我国河北满城、新疆昭苏等地冰雹中的气泡尺度多在24—60微米间，气泡数密度在 $4 \times 10^4$ — $6.5 \times 10^7$ 个/厘米<sup>3</sup>范围内。气泡最大尺度可达700微米(见图1.7和表1.4)。

#### (c) 气泡谱分布

满城、昭苏等地冰雹切片资料分析表明，透明层中气泡尺度分布范围大，气泡数量少，

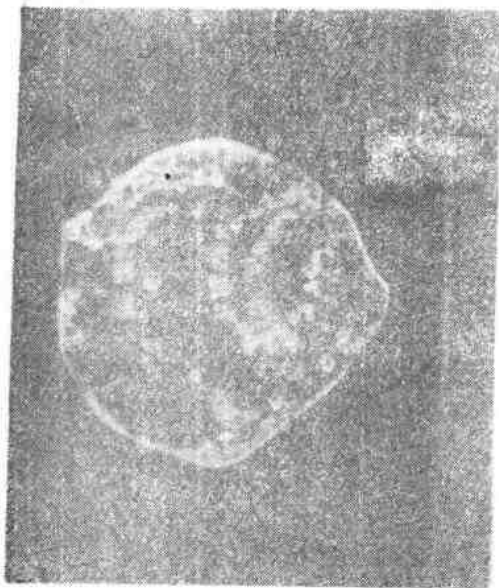


图 1.7(a) 锥形雹块切片照片(反射光)  
9层, 锥长14.8毫米 冻滴胚 $d=2.3$ 毫米,  
气泡密度 $1.6 \times 10^5$ 个/厘米<sup>3</sup>



图 1.7(b) 圆形雹块切片照片(反射光)  
3层, 雹块直径18.8毫米, 冻滴胚  
 $d=6$ 毫米 气泡密度 $3.2 \times 10^6$ 个/厘米<sup>3</sup>

尺度偏大; 不透明层中气泡数量多, 尺度较小但并非所有透明层中的气泡都比不透明层的大, 它们之间没有明显的分界线, 气泡分布多呈多峰型, 多峰型气泡谱表明雹块(胚)形成时本身受乱流影响较大, 且自身作不规则翻动中形成的。

#### (d) 雹块生长环境

冰雹的干、湿生长主要决定于环境温度和含水量, 气泡量是一种派生结果。它可以从一个侧面反映冰雹生长情况。从表1.4看出, 大部分雹块的气泡数密度在 $10^5$ — $10^7$ 个/厘米<sup>3</sup>量级间, 这表明雹块多在干、湿增长临界值附近生长, 雹块的表面温度 $\leq 0^\circ\text{C}$ 。

#### 5. 冰雹的谱分布

冰雹粒子象其它降水粒子一样也具有谱分布。在某一时段降下的冰雹, 其浓度 $N$ (即单位体积中的个数)随直径( $D$ )大小的分布就是雹谱。雹谱是描述冰雹直径与浓度之间关系的一个参量。

冰雹谱的宽度比雨滴谱要窄些, 各种大小的雹粒浓度也均匀些。

##### (1) 冰雹尺度分布

图1.8为1980年7月20日15时57分河北万全县郭磊庄降雹9分钟后的地面冰雹尺度分布。

图1.9表示1982年6月5日新疆昭苏降雹过程中两个取样部位的冰雹尺度分布。从图看出, 最大冰雹尺度为27毫米, 5—15毫米的冰雹占绝大多数。

图1.10是1987年6月29日河北满城县降雹过程中, 两个受灾地区的雹尺度分布, 这次降雹的最大冰雹直径(长轴)为36毫米, 最小为3毫米, 直径( $D$ )在3—12毫米之间的冰雹占72.2%,  $D \geq 20$ 毫米的仅占2.2%。

上述三次降雹过程中冰雹尺度分布图表明, 大多数冰雹尺度小, 产生降雹的风暴并不剧烈。

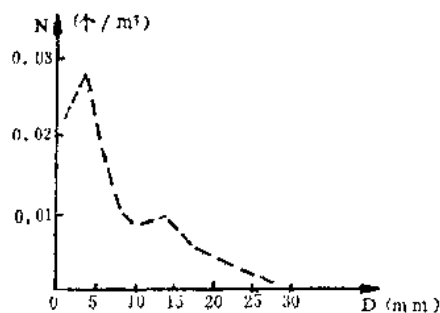


图 1.8 地面冰雹尺度分布(河北万全县)

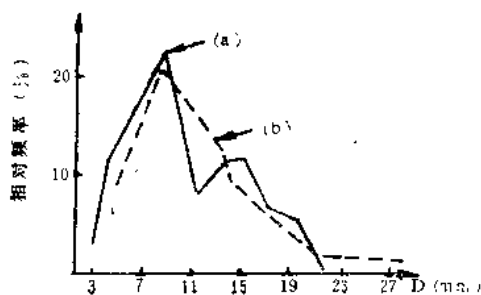


图 1.9 地面冰雹尺度分布(新疆昭苏)

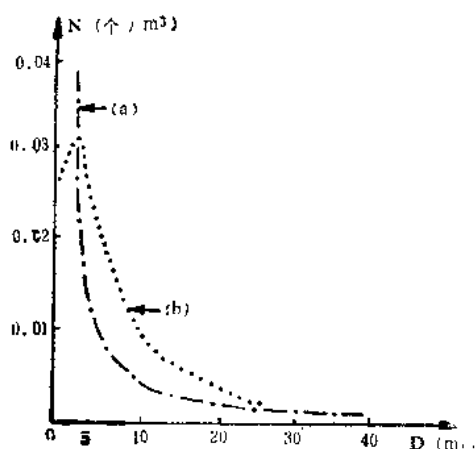


图 1.10 地面冰雹尺度分布  
(河北满城县两个受灾地区)

我国一些地区以及苏、美等国多年降雹资料表明, 绝大多数的冰雹尺度都比较小, 直径小于2厘米的冰雹占优势(见本章第3节)。

### (2) 冰雹谱的形状

雹谱的形状一般呈单峰型, 如图1.9中(b)和图1.10中(b), 对应的峰值位于  $D = 9$ 毫米和  $D = 5$ 毫米处。

图1.8与图1.9中(a)表明, 降雹地区雹谱型也常有双峰型, 但大量平均下来的冰雹谱分布仍是单峰型的。随着尺度的增大, 对应的数密度迅速减少, 如图1.10所示,  $D \geq 20$ 毫米的冰雹空间浓度为  $2.1 \times 10^{-3}$ 个/米<sup>3</sup>·毫米;  $D \geq 30$ 毫米的只有  $3 \times 10^{-4}$ 个/米<sup>3</sup>·毫米, 而在  $D = 5$ 毫米处, 对应的

的冰雹数密度为  $3.97 \times 10^{-2}$ 个/米<sup>3</sup>·毫米。

### (3) 雹谱分布的数学形式

冰雹谱多为负指数型分布, 即  $N = N_0 e^{-\lambda D}$ , 利用最小二乘法对1982年6月5日新疆昭苏及1987年6月29日河北满城降雹的雹谱进行拟合表明:

#### (1) 昭苏(1982.6.5)降雹的谱型

$$N_1 = 0.983e^{-0.33D} \quad N_2 = 1.31e^{-0.302D}$$

$N_1$ 与 $N_2$ 分别表示昭苏(1982.6.5)降雹过程的两个不同地区的谱分布的数学表达式。

#### (2) 满城(1987.6.29)降雹的谱型

$$N_{成} = 0.0737e^{-3.2105D} \quad N_{未} = 0.0134e^{-0.2316D}$$

$N_{成}$ 与 $N_{未}$ 分别表示满城成灾与未成灾地区谱分布的数学形式。

雹谱分布的数学形式也有作为直径D的负指数形式, 即  $N = AD^{-b}$ 。

## §5 冰雹的融化

冰雹在空中降落到0℃等温线高度以下时开始融化, 因此落地冰雹的尺度总小于云中形成时的冰雹。

了解冰雹的生长过程和降落过程中的融化, 并知道0℃等温线所在高度上的冰雹大小,

对于人工影响天气工作是有意义的。

冰雹从0℃等温线到地面的降落过程中，与融化有关的主要因子是：

- (1) 空气热传导作用，冰雹与四周空气进行热交换；
- (2) 水汽在冰雹上凝结释放的热量；
- (3) 水滴与冰雹碰并，不仅其热量传给冰雹，同时水滴可部分冻结释放热量；
- (4) 由于热辐射的作用，冰雹与周围发生热交换。

梅森等人的研究指出，若冰雹是球形的，在降落途中主要考虑上述(1)和(2)的影响，冰雹表面温度始终保持0℃，其半径随高度的变化为：

$$R_o^{\frac{7}{4}} - R_g^{\frac{7}{4}} = 1.20 \times 10^{-8} (Z_o - Z_g)$$

$R_o$ ：0℃层冰雹半径(厘米)；

$R_g$ ：落地时的冰雹半径(厘米)；

$Z_o$ ：降雹当天降雹地区0℃层高度(米)；

$Z_g$ ：降雹地区海拔高度(米)。

例：1980年7月20日13时 河北张家口探空记录为：0℃层高度 $Z_o = 4250$ 米，郭磊庄海拔高度 $Z_g = 784$ 米，代入上式得：

$$R_o^{\frac{7}{4}} - R_g^{\frac{7}{4}} = 0.42$$

从上式解得表1.5，从表1.5看出，郭磊庄地区半径小于0.6厘米的冰雹从0℃层落到地面时完全融化成水滴，只有大于0.6厘米的到达地面时才不完全融化。如果在0℃层高度上冰雹的尺度明显大于这个最小值，则在向地面降落期间，其尺度的减小是不很大的。

表 1.5 0℃层冰雹与落地时冰雹半径比较表

| $R_o$ (厘米) | 0    | 0.25 | 0.5  | 0.75 | 1.00 | 1.25 | 1.50 | 2.00 | 2.50 |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $R_g$ (厘米) | 0.60 | 0.68 | 0.83 | 1.11 | 1.22 | 1.45 | 1.67 | 2.14 | 2.62 |

半径 $R > 1$ 厘米的冰雹通常是明显的非球形，并具有粗糙的表面，因此，它们的阻力系数和热交换系数都比同质量的光滑球体大得多。对于一个椭球形冰雹，按照Macklin提出的热平衡方程得：

$$a_o^{\frac{7}{4}} - a_g^{\frac{7}{4}} = 2.23 \times 10^{-8} x \gamma C_D \xi^{\frac{1}{4}} \int_0^{z_o} \rho_a^{\frac{3}{4}} \mu^{-\frac{1}{2}} \times [K(T_s - T_a) + L_v \Delta \rho_v D] dz$$

$a_o$ 、 $a_g$ 分别表示0℃层高度和落地冰雹的长半轴， $x$ 是表征通风因子的一个系数， $\gamma$ 是冰雹表面积与相当球面积之比， $C_D$ 是阻力系数， $\xi = \frac{b}{a}$ 为偏心率， $\rho_a$ 为空气密度， $\mu$ 是动力粘性系数， $K$ 是导热系数， $T_s$ 是冰雹表面的平均温度， $T_a$ 是环境平均气温， $L_v$ 是汽化潜热， $\Delta \rho_v$ 是环境水汽密度和0℃时的饱和水汽密度之差， $D$ 是水汽扩散系数。

偏心率 $\xi$ 与 $a_o^{\frac{7}{4}} - a_g^{\frac{7}{4}}$ 对应关系见表1.6。偏心率不同， $a_o^{\frac{7}{4}} - a_g^{\frac{7}{4}}$ 也随着变化，偏心率越小，对应的数值越大， $a$ 值也越大。