

冰雹微物理与成雹机制

徐家骝 编著

农业出版社

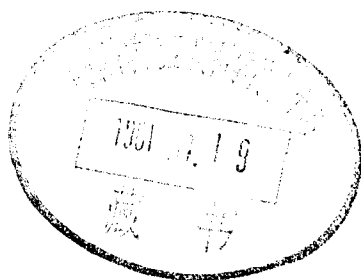
P0.34

KTL

冰雹微物理与成雹机制

徐家驹 编著

TV25/08



农业出版社

000855

冰雹微物理与成雹机制

徐家骥 编著

农业出版社出版 新华书店北京发行所发行

农业出版社印刷厂印刷

850×1168毫米 32开本 7.5印张 186千字
1979年10月第1版 1979年10月北京第1次印刷
印数 1—5,300册

统一书号 15144·551 定价 0.74元

序 言

冰雹微物理是冰雹基础研究的重要组成部分，它包含的主要内容有：（1）冰雹微结构——指冰雹的内部结构、形状、密度、雹谱等；（2）冰雹的动力学特性——指冰雹的阻力系数、末速度、运动姿态等；（3）冰雹的热力学过程——指冰雹的热量平衡、冻结过程、融化过程等。由于雹块本身的微物理特征能在一定程度上反映冰雹在雹暴中的生长过程，从实验室里还可以模拟冰雹的生长，使这些微物理特征的研究建立在较为可靠的物理基础上。因而自从云雾物理学这门气象学中的比较年青的分支学科刚刚兴起不久，人们就开始通过冰雹微物理的研究探讨冰雹生长的机制。特别自从五十年代末、六十年代初以来，冰雹切片技术被广泛应用，不同类型的冰雹风洞相继建成和进行实验。通过这些工作，建立了冰雹内部结构、密度、形状等微物理特征和冰雹生长条件之间的定量或半定量的关系，使这部分工作日趋深入和完善，并使它成为研究成雹机制的一个重要手段，直到七十年代以来，仍然显示出蓬勃发展的趋向。由于产生冰雹的雹暴是十分剧烈的自然现象，时至今日，还没能很好解决对它直接探测的问题，在这种情况下，也使得比较有可能取得观测资料的冰雹微物理的研究，在有关冰雹问题的研究中一直占有比较重要的地位。在我国目前的探测技术条件下，由于冰雹微物理的观测比起其它探测手段来看，所要求的技术条件较为简单，费用低，资料处理起来也比较方便、可靠，便于推广，因而积极开展冰雹微物理的观测和研究更具有其现实的意义。

关于成雹机制的研究，虽然早在三十年代末期就有人作了最初的尝试，但由于对雹暴和冰雹微物理等缺乏了解，在后来将近二十年的时间里没有取得多大进展。随着观测、实验技术的进步和整个云雾物理学的发展，五十年代末至六十年代初出现了一些突破，例如勒德兰 (Ludlam, F. H.) 提出的“干”、“湿”生长层的概念，德森 (Dessen, H.) 关于风的强切变对形成雹暴的作用，利斯特 (List, R.) 在冰雹风洞的实验中发现了海绵层的冰结构，……等。特别由于雷达用于云雾观测，使人们有可能对雹暴结构的主要特征有所了解，在此基础上提出了诸如冰雹循环增长、累积带等著名理论，对人工防雹作业起了很好的指导作用。不过云雾观测用的普通雷达仍然只能得到雹暴结构的间接资料，七十年代以来，国外开始使用装甲飞机和都卜勒雷达以及双波长雷达、飞机投掷仪等先进探测技术，对雹暴中的流场、含水量、水分的相态分布等开始有了较直接的观测资料，修正和补充了过去用一般云雾雷达观测所得到的某些不确切的事实。但总的看来，这些资料还很不充分，离开完整地了解雹暴结构的要求还存在不少距离。随着电子计算技术的发展，近年来在成雹机制的数值试验方面也取得了很大的进展，主要表现为：（1）考虑了微物理过程对宏观条件的反馈作用；（2）对宏观参数的时空变化更接近实际情况；（3）对微物理过程作了全面的考虑。数值试验不仅是研究成雹机制的有力工具，也是指导消雹作业的得力助手，这方面的研究从七十年代以来更有急剧发展的趋向，是值得重视的动向。

本书结合作者的研究成果，比较深入地介绍了冰雹微物理和成雹机制研究的主要内容，目的是给从事云雾物理、人工防雹和气象、农业等有关科研、教学的同志提供对这方面内容的较为系统的了解，促进这方面工作的开展，同时也可以作为有关专业的研究生和大学生用的参考书籍。全书共七章。第一章着重通过对冰雹切

片的分析, 讨论了冰雹的内部结构及其与生长条件的关系; 第二章是雹谱和软雹降水雹, 绝大部分涉及到国内的观测结果, 其中对软雹降水雹的分析是较具特色的工作; 第三章讨论了冰雹形状和生长特点的关系, 并提出了冰雹和软雹分类的意见, 对今后开展冰雹的地面观测有一定的参考价值; 第四章着重从理论上介绍了冰雹热力学过程的几个主要内容, 它和前三章特别是第一章的内容密切相关, 是后者的理论基础, 读者在阅读时可以联系起来看; 第五章全面地论述了冰雹的阻力系数和末速度的问题, 在此基础上提出了精度较高、适用范围较宽的近似公式, 是可以参考使用的。前五章的整个内容都围绕着成雹机制这一主题展开, 阅读这几章时不可忽视这一点。第六、七章是谈成雹机制, 其中第六章论述了近年来有关冰雹生长机制的研究, 通过这一章的介绍, 读者可以对成雹机制的研究现状, 即包括雹暴模式、累积带理论和成雹机制的数值试验等主要内容有个基本的了解; 第七章是作者针对目前成雹机制中存在的问题, 提出了用起伏理论研究成雹机制的新的看法, 是不同于以平均气象条件下重力碰并生长理论为基础的传统的成雹机制, 这一工作尽管还不够完善, 但具有生命力, 是值得提倡的一个方面的工作。

由于作者水平所限, 书中不免会有一些缺点和错误之处, 希望读者批评和指示, 以便今后得到修正。

本书中有关国内的野外观测工作和理论工作是在中国科学院兰州地球物理所(现名兰州高原大气物理所)和兰州大学分别完成的, 得到该两单位有关同志的配合和支持; 中国科学院兰州高原大气物理所的高由禧、杨颂禧等同志和中央气象局研究院的郭恩铭等同志对本书提出了宝贵的意见, 这对本书在定稿之前的修改工作有很大的帮助; 本书的插图主要由李静兰同志绘制, 部分插图由孙崇绍、菅玉芬同志绘制, 在此向他们表示衷心的感谢。

作 者 1978年3月27日

目 录

第一章 冰雹的内部结构与其生长条件	1
§1.1 观测方法	1
§1.2 雹胚	6
§1.3 冰雹的分层	12
§1.4 撞冻冰的微结构与生长条件	18
§1.5 同位素的分析	30
第二章 雹谱和软雹降水泡	37
§2.1 观测方法	37
§2.2 雹谱的一般特点	39
§2.3 软雹的谱分布和软雹降水泡	43
第三章 雹的形状与其生长特点	56
§3.1 观测和实验方法	56
§3.2 软雹的形状及其生长特点	60
§3.3 冰雹的形状及其出现机率	65
§3.4 各类冰雹的生长特点	72
第四章 冰雹的热力学过程	81
§4.1 雹粒热量平衡方程	81
§4.2 临界有效含水量和其它参数的关系	89
§4.3 冰雹的融化过程	95
§4.4 海绵层的冻结过程	104
第五章 冰雹的动力学特性	110
§5.1 运动物体在流体中的阻力和冰雹阻力系数的特性曲线	110
§5.2 冰雹阻力系数的半经验关系和冰雹的末速度	123
§5.3 水滴和小冰雹的末速度	140
§5.4 碰撞系数和捕获系数	149

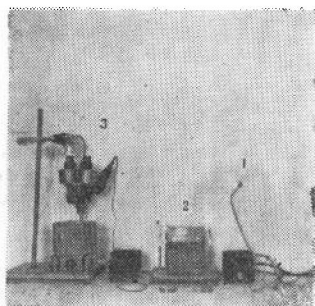
第六章	成雹机制(1)——近年来有关冰雹生长	
	机制的研究	159
§6.1	雹暴模式	160
§6.2	累积带理论	169
§6.3	一维非时变模式	179
§6.4	一维时变模式	184
§6.5	二维非时变模式	191
§6.6	二维时变模式	200
§6.7	小结	205
第七章	成雹机制(2)——起伏条件对冰雹生长的影响	210
§7.1	雹胚为多谱时在平均环境中生长的冰雹谱	211
§7.2	在多因子起伏环境中从多谱的起始质点生长的云雾和 降水质点谱的一般模式	214
§7.3	在重力加速度和湍流加速度共同作用下的冰雹和 雹胚的末速度	216
§7.4	雹胚为多谱时在含水量和湍流加速度有起伏的 环境中生长的冰雹谱	218
§7.5	其它较简单的模式	223
§7.6	小结	230

第 一 章

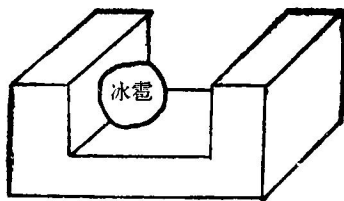
冰雹的内部结构与其生长条件

§ 1.1 观测方法

冰雹的内部结构一般采用切片方法进行观测分析，最简便的观测仪器由三部分组成（见图 1—1 a）^①：锯雹弓 1、冷却箱 2 和显微照相 3，锯雹弓的弓丝为镦铜丝或锰铜丝，通以电流后使弓丝发热，可以迅速把冰雹切下来。冷却箱（如图 1—1 b）用铜皮制成凹形的样子，内装干冰。它的用途是使被切的冰雹固



a



b

图 1—1

a—雹切片观测用的简易设备；b—冷却箱的外形。

定住和使其在低温的环境下不致融化。固定冰雹的方法可使冰雹表面某处略予融化或略沾一点水后立即贴到冷却箱凹面的一侧。

^① 这套仪器是由作者以前工作过的单位原兰州地球物理所云雾组的同志制成的。

照相机直接以镜头通过套环，套在显微镜头上，用侧射光（自然光或电筒光）对雹切片进行照相。雹样品事先装在盛有部分干冰的宽口保温瓶里，可保存2—3天以上而不改变其内部结构。锯雹弓和显微照相所需电源共同借助于1—2个汽车蓄电池供应。这一套装置比国外所用锯雹车床的方法要简便得多。图1—2至1—5即是采用上述方法所拍摄的几张照片。照片中切片的白色

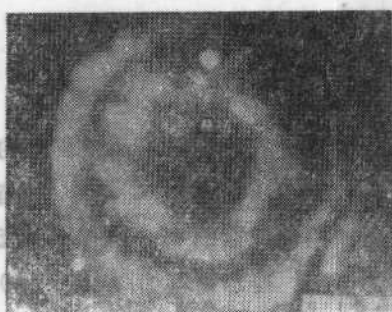


图1—2 雹切片之一⁽²⁾



图1—3 雹切片之二⁽²⁾

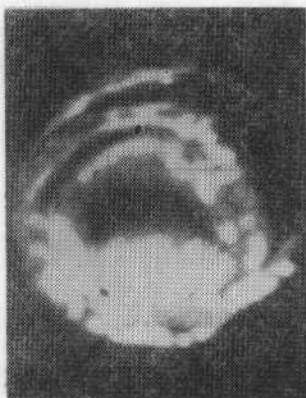


图1—4 雹切片之三⁽²⁾

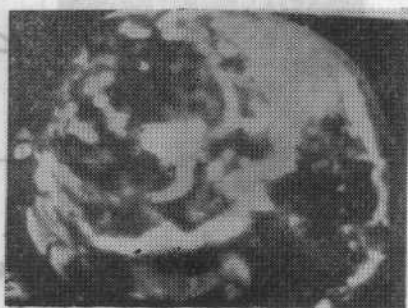


图1—5 雹切片之四⁽²⁾

部分为不透明层，黑色部分为透明层。这是用侧射光或反射光的情况，如果用透射光，得到的图片将是相反的，即白色是透明层，

黑色是不透明层。用透射光可以照出切片中气泡的细微结构，图1—6a和1—6b就是这一类照片，其中黑点是气泡，气泡比较集中因而整个看起来呈黑色的层次是不透明层，其它气泡比较少或者基本上不包含气泡的白色层次是透明层。

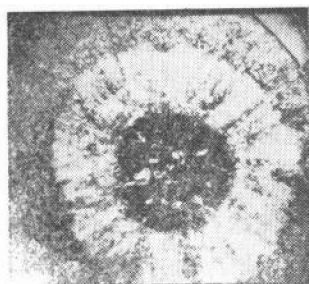


图1—6a 雹切片之五⁽³⁰⁾

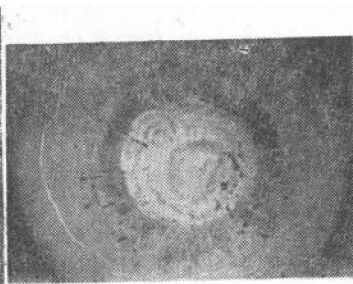


图1—6b 雹切片之六a⁽³¹⁾

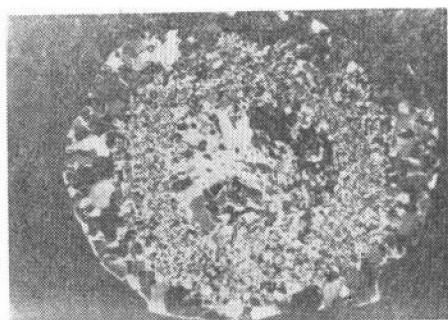


图1—7 雹切片之六b⁽³¹⁾

如果用偏振光作为光源对雹切片进行拍摄，还可以得到冰雹各层冰晶结构（形状、大小、走向等）的情况。图1—7是与图1—6b同一个雹切片但用了偏振光作为光源拍摄的照片。拿图1—7和图1—6b作比较，可以看到不透明层的冰晶比较小，透明层的冰晶比较大。

对雹切片的观测主要是获取冰雹各层的气泡大小分布和数密度、不透明度、冰晶走向、大小分布和数密度等情况，而这些参数都可以先通过实验找出它们和环境温度、雹体温度、液态含水

量等环境参数之间的关系，从而借以推论冰雹在云中所经历的生长条件，这对研究冰雹生长机制是很有价值的。

为了观测到上述有关气泡和冰晶的详尽而确切的情况，在获取雹切片时必须十分细致。切片要求尽量薄些，对单个冰晶排列的彩色照相取0.35—0.45毫米的厚度，如果作黑白鉴别则取0.25—0.35毫米，冰晶愈小，要求切片愈薄，要薄到使偏振片之间的冰晶图象呈现出灰色的阴影。观测气泡时，气泡愈小，也一样要求切片愈薄，例如对透明冰层能达到0.5毫米厚即可满足要求，对不透明冰层最好再薄一些。不过一般观测冰雹各层的气泡和冰晶，其大小是很不一样的，但用的是同一块切片，故对雹切片的厚度一般以0.2—0.4毫米为宜。薄切片的实施过程一般是这样：先将冰雹的一面融化后冻结在玻璃片上，切割一次后颠倒过来再切，得到一块粗糙的薄切片，然后每次按0.3—0.4毫米的厚度依次切割，直到达到所需要的厚度。切片和玻璃片之间的冰层冻结时不厚于0.02毫米，这样薄的中间层，在偏振光中不致产生色彩效应，从而改变薄切片本身的冰晶结构；另外，切片和玻璃片冻结时要求缓慢一些，以免产生大量小气泡。拍摄冰晶结构时所用的偏振片是两片，一片放在光源和雹切片之间，另一片放在雹切片和显微镜的物镜之间，后一片的偏振方向与前一片相垂直。当切片放在这种正交偏振片之间时，切片中的每个结晶体使光线偏振面旋转了某一角度，其转动的角度取决于晶体的取向，因而各自不同取向的晶体便显现出灰白不同的形状。另外，也可以采用热力蚀刻痕迹的走向⁽⁶⁾或者用形成于表面的冰晶延伸沉淀物⁽⁷⁾来确定较大晶体的走向。

有条件的话，最好采用以下较为严格的方法来取得观测气泡用的切片⁽⁴⁾：先用锯将冰样切成几毫米厚的粗切片，用细金刚砂纸将其一面磨光，把光面置于玻璃片上，将过冷态的邻苯二甲酸二乙酯（融点是-7℃）灌在切片上，使整个液体冷却固化后，再用显

微切片机将其切成要求的厚度，而后把玻璃片放到显微镜台上，保持 -5°C ，使上述液体再次液化（冰切片并不融化），即可进行照相。切片之所以要求保持低温，是因为如果温度太高，有可能改变气泡的数密度和大小的分布。

对冰切片的不透明度的测量可采用下边简便方法^[5]。这个方法主要是测量光束通过切片时的衰减情况，所用设备如图 1—8 所示：栓测器是一个硅光电池，光源用一般显微镜灯泡给出一束平行光，通过红外滤光片射入冰切片，衰减后的光束再通过栓测器下方的一支切成半厘米长的注射针头的小孔，为光电池所接受，而后信号被放大馈给曲线记录器。冰切片放在与螺杆相连的玻璃片上，用同步马达带动螺杆使切片以 0.1 毫米/秒的速度通过栓测器的小孔。改变小孔的口径（针头）可以得到不同的分辨率。经过用不同厚度的冰切片作对比测量，发现 1 毫米是最佳厚度。当前后光束强度比 I/I_0 。（ I 是透过冰片的光强， I_0 是未透过冰片的光强）从 1 到 0.2 时，精确度是 $\pm 1\%$ 到 $\pm 5\%$ ， I/I_0 在 0.2—0.1 之间时，误差增至 $\pm 15\%$ 。

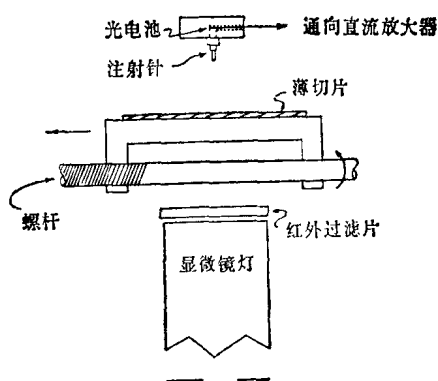


图 1—8 测量冰切片不透明度的设备^[5]

§ 1.2 雹 胚

雹胚位于冰雹的中心，从冰雹切片中可以清楚地辨别出来，它在冰雹生长史中具有特殊的意义。

根据甘肃岷县地区两次降雹过程（1964年6月22日和7月1日）⁽²⁾和平凉地区两次降雹过程（1976年6月4日和1977年6月25日）得到的切片资料⁽³⁰⁾，基本上可以把雹胚分为六大类型（见图1—9a、b及表1—1）：A类是透明的圆球（图1—2）或椭球形，这一

表 1—1 平凉地区1977年6月25日一次降雪中的雹胚类型

类 型	透明、半透明的圆球	不透明圆球	透明、半透明的椭球	不透明椭球	锥形	矩形	总数
个 数	47	28	23	7	2	1	108
%	43.5	26	21.3	6.45	1.85	0.90	100

图 例								
类型编号		A	B	C	D	E	F	不明
数 目	(6月2日)	7	10	18	12	0	1	0
	(7月1日)	1	2	3	5	5	0	3
最大尺度 (mm)		4.5—5.0	3.0—4.5	4.5—5.0	4.0—4.5	4.5—5.0		

图 1—9a 岷县的雹胚类型

图 例					
类 型	A	B	C	D	E
个数	8	5	4	4	4
百分比	32	20	16	16	16

图 1—9b 平凉的雹胚类型(1976年6月4日)

类的来源可能是特大水滴缓慢冻结而成。B类和C类分别代表含大气泡和含小气泡的不透明的圆球(如图1—3),个别也有接近圆球的椭球形;它们虽然都属于“干”增长类型,但是C类所处的环境温度可能更低些,冻结速度更快,因而有更多空气来不及释放出来,而形成比较多的小气泡。D类和E类分别代表锥状或椭球状部分透明型(图1—4)和锥状或椭球状不透明型,它们和B、C类形成条件的主要区别可能是在云中翻滚的机会少些,即主要是定向地下落;而B类和C类则在云中翻滚比较厉害,因而各方面受气流冲击和云滴碰并的机会比较均匀。F类呈苹果形(图1—5),它是由两个大小相当的冰球粘连在一起,这类雹胚在文^[2]以前的国外文献中没报导过,后来有人^[9]在加拿大曾经观测到这种类型雹胚。关于苹果形雹胚的成因,根据大型垂直风洞中所作的过冷水滴冻结的实验^[10],如果有一个冰球的表面比较湿,另外一个冰球则是干的而且温度比较低,当两者相遇时,由于前一个冰球表面液态水的冻结可以使两个冰球粘连在一起,显然,这种情况下形成雹胚的两个冰球,其来源应该是两种不同的环境(湿而暖和干而冷)。另外一种情况是过冷水滴冻结后只在表面形成一层冰壳,如果某一个冰球的外壳发生裂缝使里边液态水溢出来,当这个冰球与另外一个冰球相遇时,也可以因为溢出来的液态水的冻结而粘连在一起。图1—9c是该实验中两个冰球粘合的情形。

以上的分类主要是根据雹胚形状和气泡情况分类,是用侧射光拍摄的切片看出来的,从中已经了解到各类雹胚所代表的生长条件,以下结合雹胚的冰晶结构(需补以偏振光拍摄的切片)情况所作分类,则对雹胚的生长条件可以得到更多的了解。图1—9d是根据南非一次降雹搜集到的55个冰雹的切片资料所作的分类^[1]:图例中带“×”表示含有许多小气泡和由小冰晶所组成,细线表示大冰晶主轴的走向。A型为不透明的圆球或椭球,是干增



图 1—9 c 实验中两个冰球粘合的情形
(两球相联后水平总长度为19毫米) [10]

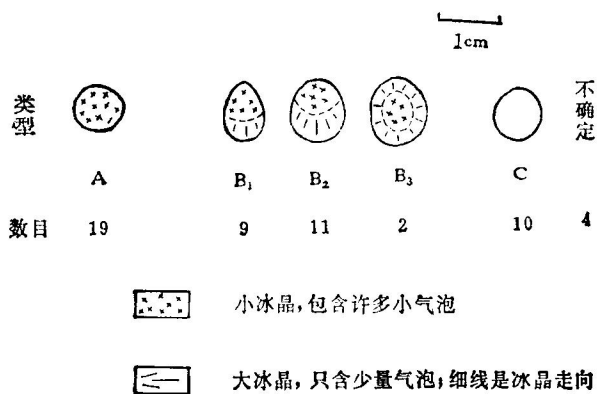


图 1—9 d 结合冰晶结构的雹胚的分类 [3]

长条件下形成的球状霰粒或软雹, 这种类型的数目最多。B₁型为尖顶不透明底部透明的锥形, 是先干区形成锥状软雹以后在湿区通过时定向下落的小冰雹。B₂型是上干下湿带椭球形的小冰雹, 它的形成过程应是先形成球形软雹, 以后在湿区通过时基本上定向地下落。由于大冰晶主轴的走向表示冰晶的生长方向, 在

B_1 和 B_2 的湿区的细线与气流方向基本平行,故反映了该层生长时雹胚作定向的下落。 B_3 型是中间有一个球形软雹,周围比较均匀地并合上一层透明冰,呈圆球形或椭球形,它们的过程应是先形成球形软雹,后来在扰动比较厉害的湿区中作随机翻滚而成。 B_2 和 B_3 这两类雹胚比较大,平均直径都达到1厘米左右,最大可达到1.4厘米左右。C型是近乎球形的透明冰粒,内部由随机排列的大冰晶所组成,图1—9d中这类雹胚因为平均直径已达8毫米左右,除了其中比较小的之外,其它较大的透明冰粒不大可能由大水滴直接冻结而成。

各类雹胚的出现机率反映了它们的源地情况,图1—9a的6月22日和图1—9d中以球形软雹占多数,说明它们主要来自温度较低的高层;而表1—1和图1—9b中则以透明、半透明圆球占多数,说明它们主要来自温度不太低的大水滴区。

对雹胚谱分布的分析直接有助于成雹机制的研究,图1—10a实线和图1—10b是两种类型的分布,后者比较接近正态分布;另外,从其中透明、半透明圆球形雹胚的谱分布(图1—10a点断线和图1—10c),对照冻结实验结果,可以了解其环境温度,也有助于雹胚源地的研究。

关于各类雹胚出现机率和冰雹大小的关系,可以看图1—11的情况⁽¹⁾,该图根据落在南非比陀利亚—约翰斯堡地区的4年以上几千个冰雹样品中的637个雹胚资料分析得到的。这里把雹胚分成三种基本类型:a类是透明的冰球,以圆球状为主;b类是不透明的冰球,仍以球状为主;c类是带不透明尖顶的锥形小雹。另外还有100个雹胚不能确定其类型。从图1—11中看出,不论冰雹的大小,不透明的球状始终占主要成分。当冰雹主轴长度比3—5厘米小时,透明的球状比锥状小雹多一些,但从3—5厘米以后,锥状的数目开始迅速上升(利斯特在瑞士观测到大雹中有80%是锥状软雹作为雹胚,与这里的趋势一致)。透明球状的数目从