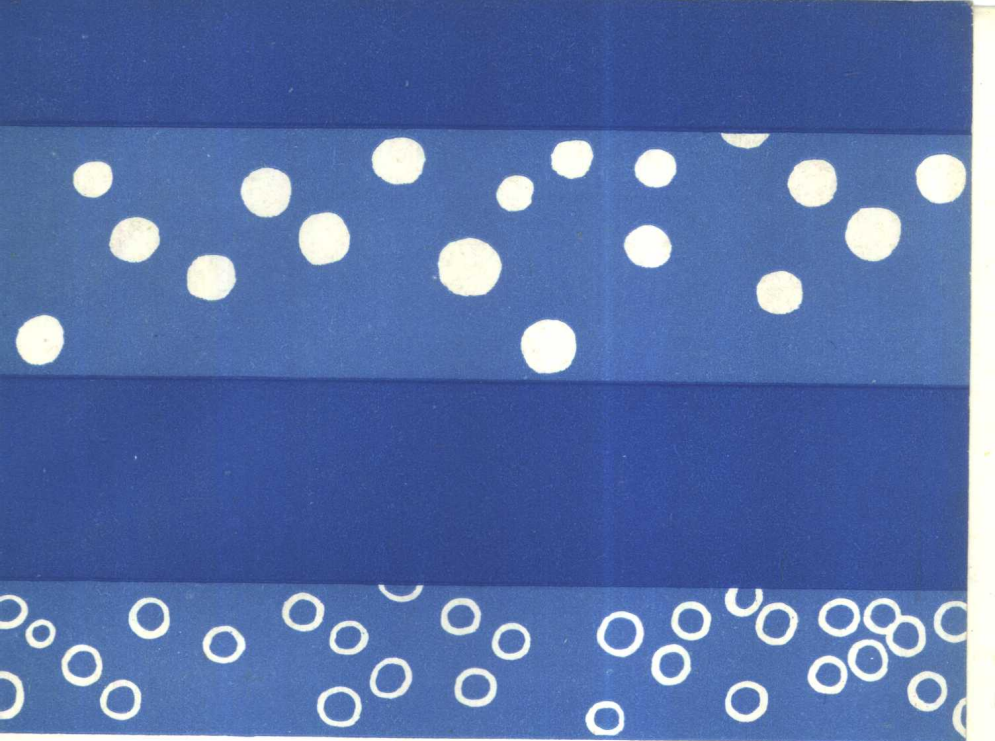




甘肃冰雹云结构研究

● 廖远程 编著

● 气象出版社

甘肃冰雹云结构研究

廖 远 程 编著

气象出版社

内 容 简 介

本书综合概述了甘肃省永登、岷县人工防雹试验基地关于冰雹云物理问题的主要研究结果，并把重点放在冰雹云结构研究方面。全书共分八章，第一章冰雹云气流结构；第二章冰雹云温度结构；第三章雹暴逆温层特性分析；第四章，雹云的分类结构；第五章龙卷回波结构；第六章雹云中含水量的分布；第七章雹云中电场分布；第八章雹云识别。

本书可供人工影响天气工作者、雷达气象和大气物理专业研究人员及其有关院校师生参考。

甘肃冰雹云结构研究

廖 远 程 编著

责任编辑 林 雨 晨

* * *

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京印刷一厂印刷

气象出版社出版 各地新华书店经售

* * *

开本：787×1092 1/32 印张：3.375 字数：72千字

1990年1月第一版 1990年第一次印刷

印数：1—1000 定价：2.45元

ISBN 7-5029-0380-1/P·0213

前 言

冰雹是一种剧烈的天气现象,常常形成严重的自然灾害,它是云中宏观动力、微观物理过程相互作用的结果,是云物理学研究的主要部分。冰雹和其它雷暴、暴雨、龙卷等灾害性天气现象一样,都是局地强对流天气,主要天气现象为降雹并伴有雷雨和大风。它是我省主要灾害性天气之一,具有来势迅猛、破坏力强,影响范围广而又局地性很强的特点。产生冰雹的冰雹云是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重要性和普遍意义。此外,就人工影响各种天气这一长远目标来说,冰雹出现次数比龙卷多得多,雹云尺度较台风小,在中小尺度灾害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。

冰雹云体积庞大,演变过程复杂,目前还无法从总体上进行室内模拟实验。当然最主要的原因还是目前对冰雹云的认识不够,对其规律性了解太少了。欲究防雹之效果,必需加强雹暴和雹块形成规律方面的研究,必需加强冰雹云结构的研究,所以两者应该有机的结合起来,齐头并进,以加快人工防雹科研的步伐。人工防雹是人工影响天气的重要组成部分。人工影响天气是气象学的最终目标之一,它的研究必将推动人工控制天气的进展。

甘肃省祁连山区以东,乌鞘岭以南的五十六个县(市)每年约有二百万亩左右的农田遭受雹害,损失粮食约一亿公

斤。尤其是夏秋作物，川区待割，山区待熟的黄金时节，多数地区作物已不能复种，这时，一场冰雹常产生毁灭性影响，正如俗话说：雹打黄山要命。因此，怎样才能战胜冰雹，以利农业生产，一直是广大农民梦寐以求的愿望。为了科学地总结防雹抗灾的经验，探索降雹规律，了解雹云结构，提出适当的防雹方法，二十六年来甘肃省气象局组织科技人员深入多雹地区调查研究，开展防雹试验。在永登、岷县设立人工防雹研究基地。1971年初建立永登防雹试验基地，开展为期15年的防雹试验，基地面积760平方公里(包括永登、天祝两县的四个公社)，1973年启用711测雨雷达，配备701测风雷达；基地设有13个地面观测点，各点均配有压、温、湿、风和雨量等五个自记仪器，每天进行5次定时观测；基地探空站每天一次定时施放探空和不定时的入云探空。由于科研的需要，防雹基地担负着地面气象观测、通讯、预报、探空、雷达、雹情、雨情、冰雹切片、雹云录像等资料的收集任务。永登防雹研究基地位于甘肃中部，在祁连山东段，是中纬度的内陆山区，冰雹频繁，基地范围内6—8月，年平均降雹18次，最多可达31次，一年约有两次强降雹过程，雹如核桃、鸡蛋。单点降雹每年7—8次，这对研究冰雹是个理想的地方。15年来永登防雹试验基地，取得了1000多次降雹区环境场的无线电探空资料，100多次进入雹云和雷雨云的宝贵探空资料，数十次雹日和雷雨日(一天施放4—7个无线电探空)的资料，这是用常规仪器取得的资料，来之不易，非常宝贵。还有150多次冰雹过程近万张的测雨雷达探测雹暴的回波照片和探测数据(雷达经过标定)，取得了700张冰雹切片(自然光、偏振光)的照片资料，取得了六万余份地面观测网点资料，这些资料，都是兰州干旱气象研究所人工影响天气研究室全体

同志观测、探测、收集、整理的，並进行了大量的统计工作，为深入研究雹暴提供了依据。根据这些资料我们对冰雹云的气流和温度结构、雹云的雷达回波特征、龙卷回波特征，冰雹预报、雹云识别、雹云的分类特征及其降雹部位的探讨，雹暴逆温层特征、防雹效果、防雹武器等方面进行了分析研究。

本书着重介绍我省在冰雹云结构的探测研究成果，关于雹云中含水量和电场分布，我们做的工作很少，书中主要引述中国科学院兰州高原大气物理研究所在甘肃平凉防雹试验基地的研究结果。虽然编著者25年来从事组织並参与人工防雹试验研究，然而，对于一门目前尚处于试验研究阶段的新兴学科——人工影响天气来说，由于认识水平有限，不可避免地有局限性，错误缺点难免，不妥之处，敬请读者批评指正。

在编写过程中，承蒙国家气象局气象科学研究所人工影响天气研究所郭恩铭副研究员和张纪淮副研究员审校修改，兰州干旱气象研究所徐国昌高级工程师热情指导及有关同志提出宝贵意见，在此向他们表示衷心的感谢。

编著者

1989年2月

目 录

前言

第一章 冰雹云气流结构	(1)
§ 1 地面流场分析	(1)
§ 2 雹云中气流初探	(4)
§ 3 环境风分析	(7)
§ 4 指状回波根部附近的气流结构	(9)
第二章 冰雹云温度结构及其天气形势	(17)
§ 1 冰雹云的环境温度	(17)
§ 2 雹云内温度的分布	(24)
§ 3 降雹前大气温度层结特征	(27)
§ 4 降雹的天气形势	(27)
第三章 雹暴逆温层特性分析	(34)
§ 1 逆温层出现的日数	(34)
§ 2 逆温层与高空风	(36)
§ 3 贴地逆温	(37)
§ 4 高层逆温	(37)
§ 5 雹日天气分型逆温分析	(42)
§ 6 雹日逆温层的演变过程	(44)
第四章 雹云的分类结构	(46)
§ 1 强单体	(46)
§ 2 多单体	(52)
§ 3 中小系统单体	(63)
§ 4 一般单体	(66)
第五章 龙卷回波结构	(69)
§ 1 龙卷活动特点	(69)

§ 2 龙卷回波特征·····	(71)
§ 3 龙卷附近的风场·····	(75)
第六章 雹云中含水量的分布 ·····	(77)
§ 1 含水量的分布特点·····	(77)
§ 2 雹云反射率随高度的分布·····	(78)
§ 3 雹云反射率随时间的演变特征·····	(81)
第七章 雹云中电场的分布 ·····	(83)
§ 1 雹云中的电场·····	(83)
§ 2 冰雹云的闪电频数特征·····	(83)
第八章 雹云识别 ·····	(87)
§ 1 雹云的宏观特征·····	(87)
§ 2 雹云的雷达指标·····	(89)
§ 3 弱雹暴与强雷雨的异同分析·····	(90)
参考文献 ·····	(99)

第一章 冰雹云气流结构

冰雹云和其它发展强烈对流云的结构，大多数是以气流场，特别是垂直气流场为骨架构成的。从雷达观测雹云看，回波结构与气流场有密切关系，因为冰雹云水汽凝成物的分布相当程度上受到这一动力因子的影响。现介绍地面流场，雹云中垂直气流，环境风的研究结果^[1]。

§ 1 地面流场分析

空间的流场结构不光可以起到输送水汽的作用，而且对于雹云的形成以及降雹的发生具有重要的影响。但是地面附近的风都是摩擦层内的风，受地表面条件，即地形、地物状态影响很大的风，我们分析时要特别仔细。

1. 降雹区单站风的探测

对永登防雹试验基地石门岷测站46次降雹实况与地面单站风探测资料分析表明：雹云过境地面单站风向和风速将发生显著变化，基本上可分为两大类：一类是降雹前后风向改变，风速增大约占71.5%；另一类是降雹前后风向不变，只是风速增大约占28.5%，当风向改变或风速加大后几分钟到十几分钟，即开始降雹。据统计，87%的降雹过程，在降雹前均吹东南风，且风速较小，在4米/秒以下。低空为较弱的东南气流，有利于低空热量的积聚。

雹云过境时，风向风速的明显变化，常常与飑线、切变线或辐合线相联系，与此同时段的气象要素也发生急剧的变化，气压跃升、温度急降、湿度猛增、降水量迅速增大，以

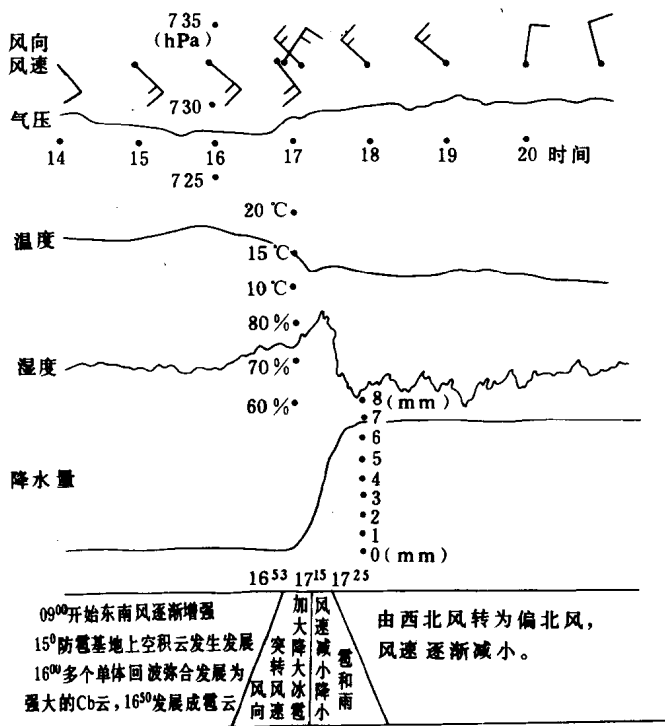


图 1.1 1978年8月10日石门岬单站风与压、温、湿
降水量对应关系

及地面降雹降雨是相互对应的, 如图1.1所示。

2. 降雹区中小尺度风场

降雹区在降雹前局地是一个辐合风场。例如, 1978年8月10日强雹日分析指出: 图1.2(a)降雹区地面吹西北风, 被 $-\Delta P_{24}$ 所占据, 并处于冷性状态, 此时辐合运动还未产生(多在9时30分左右形成局地的辐合运动); 图1.2(b)降雹区风向早已转为东南风, 形成辐合区; 图1.2(c), 辐合加强, 局

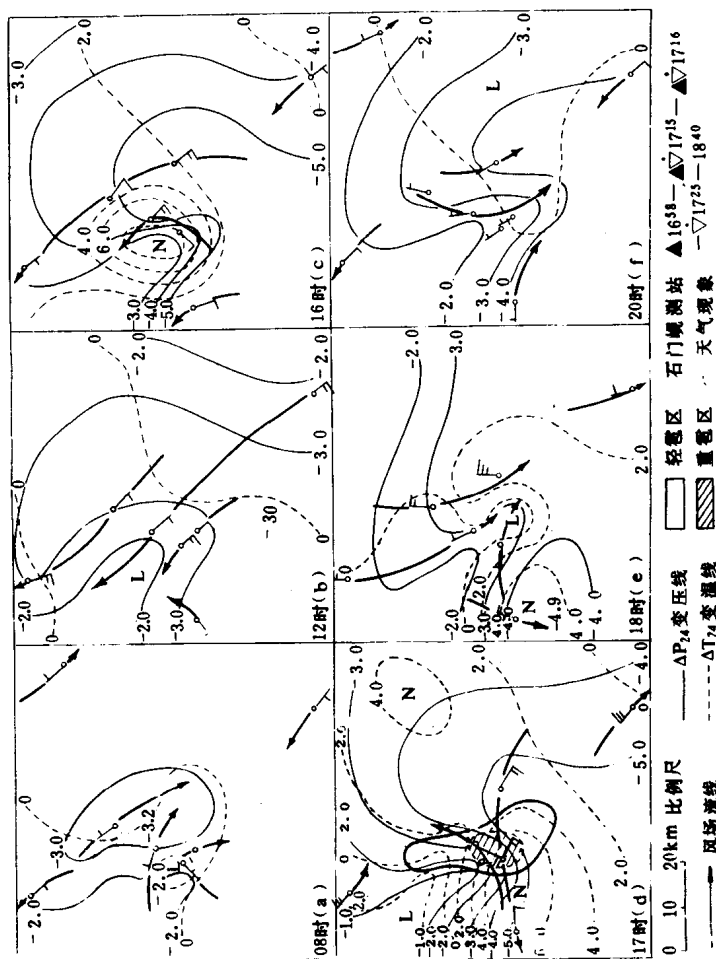


图 1.2 1978年8月10日降雹区中小尺度分析图

地增温也较快,对照实况,正是雷暴单体聚集相接,发展迅猛的时刻。随后降大冰雹(最大直径50毫米)就出现在高温中心的右侧,也是风向辐合的地方,见图1.2(d),此时辐合仍然维持,降雹持续至17时25分,降雹结束,辐合风场也随之消失。图1.2(e),图1.2(f),风向已转为西北风,这表明低空气流辐合是雹云形成的一个重要因素。

§ 2 雹云中气流初探

云中上升气流和下沉气流的存在是形成冰雹的重要因素之一,云中垂直气流的大小与雹云的发展及冰雹的增长速度有着密切的关系,现利用探空曲线近似计算如下:

假设 W_1 为气球对地速度, W 为垂直气流速度(即空气对地速度), W_2 为相对速度(气球对空气的速度),有

$$W_1 = W + W_2$$

所以 $W = W_1 - W_2$ (W_1 值可由探空曲线查出)

在入云气球附水结冰可能性小的强上升气流区, W_2 可类以晴空区情况计算,但实际值应大于文中值。

1. 雹云中垂直气流分布

图1.3中曲线(1)(2)(3)表明,雹云中垂直气流速度随高度的分布近似抛物线,即垂直气流速度随高度的增加而增大,在雹云中上部达到极大值,往上垂直气流速度又迅速减小,出云后有一股持续而微弱的下沉气流,强雹云中垂直气流速度都超过12米/秒,测得最大值为28米/秒。同时也探测到云中垂直气流随高度的分布成抛物线,但有两个峰值,分别出现在云层中上部和中下部,峰值愈大降雹愈强,峰值愈高,冰雹愈大。上升气流成抛物线分布的特征,对云体的发生和维持有密切相关。它不断输送了大量水汽,并支撑着

云体粒子增长，导致大水滴积蓄在云层中上部，形成悬挂回波里的冰雹生长区。

由于气球入云部位不同，常探测到雹云中有下沉气流，有时测得整层均为起伏式下沉气流，负极大值多出现在云层中下部。例如：1973年7月5日16时30分入雹云探空资料表

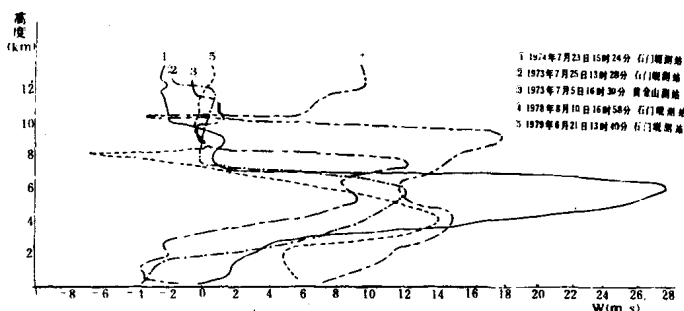


图 1.3 雹云垂直气流随高度变化曲线比较

明：从300百帕到268百帕间，气球升速开始减慢约为390米/分，从268百帕（10910米）起气球下沉到278百帕（10600米），下沉2分30秒，下沉厚度310米，平均下沉气流速度为 -8.8 米/秒。这说明从268百帕起有强烈的下沉气流（其最大值为 -9.2 米/秒）迫使探空气球下沉。

2. 强雹云二维结构一例

根据雹云垂直剖面和平面对波及地面实况探空资料综合分析可推测：上升气流从雹云的移动前方右侧底部进入雹云，通过雹云主体，从云层上部移动的前方离开雹云；下沉气流从雹云后部，云层中部进入雹云，又从雹云底部离开雹云，从气流场配合看，雹云的低层水平风场是向云中辐合的，雹

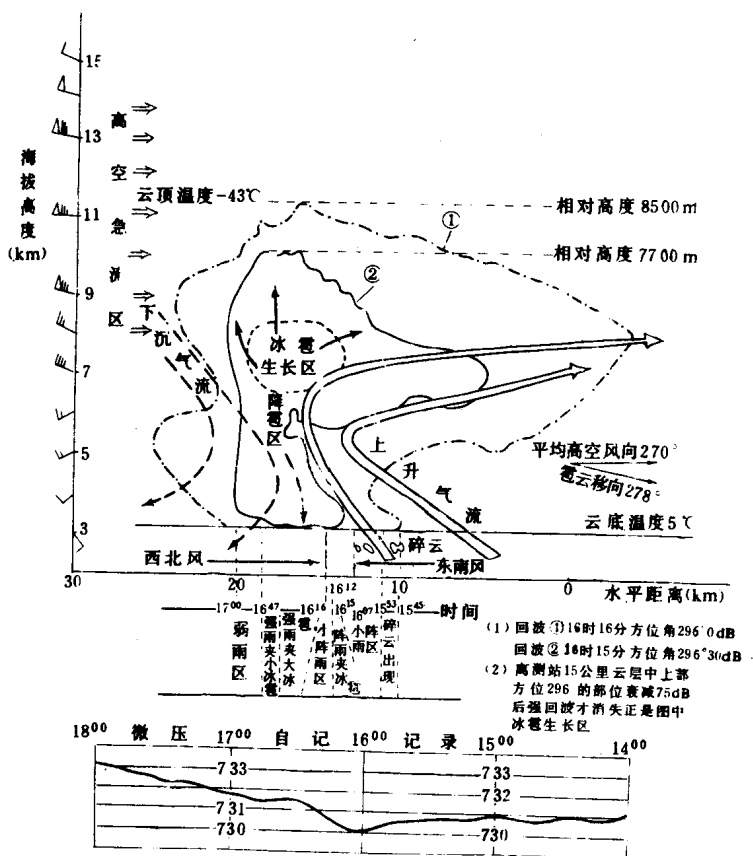


图 1.4 1973年9月4日冰雹云结构示意图

云顶部上空气流是辐散的，强雹云的气流模式和Browning的相似，图1.4就是一次个例的结构示意图。

§ 3 环境风分析

空气处在不停的运动中，它既有水平运动，又有垂直运动。空气的运动，对大气中的热量、水汽、固态杂质等的输送以及对云、降水、雷暴、冰雹的形成和发展都有重大的作用，众所周知，高空急流对天气系统的移动有一定的导向作用，中高空的风场更对单个对流云的发展有着不可忽视的影响，因此有必要了解它的分布规律及其作用。

1. 霪日09时高空风

高空风的垂直分布是：近地层风向为北东北，风速约3米/秒左右；从5.5—18公里均为偏西气流，3—6公里有明显的风向切度，切变的极大值出现在5—6公里，6—12公里有明显的风速切变，风速切变的极大值出现在9—10公里，10—14公里为高空急流区，风速最大值在12公里高度，14公里以上风速迅速减小，风向作顺时针旋转，24公里以上为偏东气流，(见图1.5)。

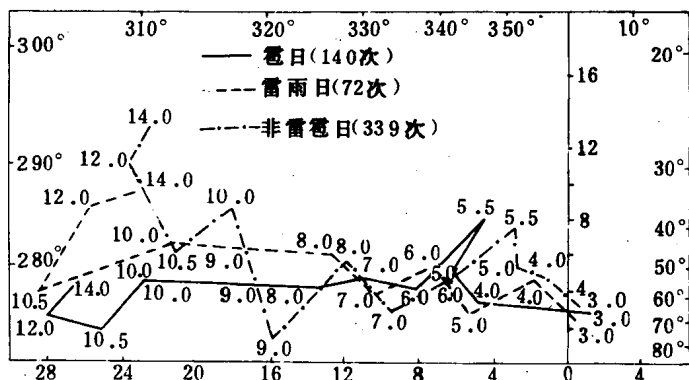


图 1.5 1971—1978 年永登防雹基地石门岷测站霪日、雷雨日、非霪雷日09时高空风分析图

高空风分布的特点：整层均为偏西气流控制，随着高度的增加风速逐渐增大，低层风向切变明显，并作顺时针旋转，高层风速切变明显，风向作逆时针旋转，这一分布规律容易形成高层冷平流，低层暖平流，低层一支，主要是提供暖湿空气。上层一支为干冷空气，它与低层暖湿空气叠加构成上干冷、下暖湿的位势不稳定层结，有利于对流性不稳定层结形成。

2. 高空急流

降雹日09时高空急流区厚度约6—8公里，均为西北气流，风速20—40米/秒，雹云顶部垂直气流速度接近于零，与高空急流区下层是相互对应的。雹云顶部可伸展到高空急流区下限高度上方1—2公里，急流的强弱与成雹的大小，雹灾的严重程度有很大关系，显然强雹云比中等强度雹云和弱雹云，高空急流要强得多，但不是成比例增大。高空强风区所能提供的能量，不仅可以弥补高层热力层结稳定的缺陷，而且还能助长对流冲到对流层顶或以上。根据积云动力学理论^[2]，急流主要起到动力性抽风作用，有利于对流的维持和发展。所以高空急流的存在是冰雹云发展的能量来源的一个重要部分，它为对流发展成为强烈雹暴系统，并为云柱不断更新提供了有利机制。

3. 中空风向风速切变

雹日09时中空风向风速切变(主要是风速切变)最大值，恰好位于雹云内上升气流速度最大值的上侧，并与含水量最大区域，强回波区域互相对应，切变梯度3—6米/公里，最大可达10米/公里，其厚度2.5公里，位于海拔8—10.5公里，它就是高空急流下的垂直风切变，强雹日风切变梯度强，其相应高度也下降。我们认为：风切变大，迫使上升气流和云柱

倾斜, 这样雹粒在广阔准水平方向增长的机会远比在垂直方向的机会要大得多。这表明: 中空强风速切变所在的高度与冰雹生长区互相对应。目前认为^[3], 并不是切变愈强时对风暴发展愈有利。因为垂直切变太强会使大量的雨滴带至云外蒸发, 所以不如中等强度切变有利。

4. 雹云内高空风

根据11次入雹云无线电探空资料与当天09时探空对比, 雹云内水平风的分布特征是: 雹云内高空水平风速随着高度的增加而逐渐减小, 最小值出现在雹云中部(海拔6—7公里)水平风速很小, 为1—4米/秒, 海拔10公里以下(相当云顶高度以下)的各层水平风速比09时测得各层风速小得多, 而海拔12公里以下高空风速比09时探测结果偏大, 雹云中部以下的高空风速与09时相比有较大的风向切变, 雹云顶位于最大水平风速层下约1公里左右。

§ 4 指状回波根部附近的气流结构

1978年8月10日发生在甘肃省永登地区的一次超级单体雹暴的特征^[4]: 这个超级单体是由多块小单体在一个主要单体上并合而成的, 它的右侧有一个指状回波, 整个指状回波及其根部附近的主体回波都是强降雨区。超级单体入流缺口处的气流结构, 中下层反气旋式旋转, 中上层气旋式旋转的上升气流将一部分冰雹粒子带到右侧降落, 形成指状回波。

1. 雷达回波特征

16时05分, 平面显示器上在测站西北有一条东西向的带状回波, 回波单体各自存在, 互相没有连接并合, 中间有一块较大的单体, 这块较大的单体以20公里/小时的速度向东南移动, 并不断同其它回波单体发展并合, 到16时42分发展成