

# 偏振雷达观测强对流雹暴云\*

张鸿发 郅秀书 王致君 张义军

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

*β4 A*

**摘要** 根据偏振雷达原理, 用C波段双线偏振天气雷达观测得到4例强对流雹暴演变过程的水平反射率 $Z_H$  (dBZ) 和差分反射率 $Z_{DR}$  (dB) 垂直剖面RHI定量回波资料, 分析了这些雹云不同演变阶段的回波参量和偏振特性的关系, 说明 $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 双参量对判别降雹有着明显优势, 用雨滴谱的 $Z_H$ - $Z_{DR}$ 分布边界关系对这些雹云回波进行判别降雹分析, 给出我国用偏振雷达观测和识别冰雹的研究结果。

**关键词:** 强对流雹暴; 偏振特性;  $Z_{DR}$  回波; 识别降雹

## 1 引言

定量识别冰雹一直是气象界一大课题, 经半个世纪常规天气雷达观测和研究表明, 用单参量回波信息从混合云中区别不同相态粒子是困难的。近些年, 世界上不少国家开发偏振雷达技术, 用偏振回波信息, 对云和降水微物理的演变, 云、电现象, 从降水中区别雨和冰雹的观测和研究取得了有价值的结果<sup>[1]</sup>。Seliga等<sup>[2]</sup>首先提出用分集偏振雷达测量差分反射率 $Z_{DR}$ 。观测结果表明,  $Z_{DR}$ 可以改进测雨精度, 特别对中到大降雨率, 因为 $Z_{DR}$ 与雨滴形状和尺度之间有良好的相关<sup>[3]</sup>。由于冰雹形状和下落习性与雨滴不同, 在探测中发现冰雹区具有相对高反射率而 $Z_{DR}$ 值是低的或接近零<sup>[4]</sup>。Aydin等<sup>[5]</sup>认为 $Z_{DR}$ 对冰相出现是好的指示器, 提出用雨滴谱的 $Z_H$ - $Z_{DR}$ 平面边界函数 $F(Z_{DR})$ 关系 $H_{DP} = Z_H - F(Z_{DR})$ , 当 $H_{DP} > 0$ 可以从雨雹混合降水中区别冰雹<sup>[5]</sup>, 因为冰粒子的形状与尺度没有定量关系<sup>[6]</sup>。Illingworth等<sup>[7]</sup>利用偏振雷达观测结果表明, 最小负 $Z_{DR}$ 值区与最大 $Z_H$ 区相接近, 负 $Z_{DR}$ 区对应地面测雹板记录到2.3 cm直径雹块, 观测到冰雹云的 $Z_H$ 与 $Z_{DR}$ 呈负相关<sup>[7]</sup>。Brangi等<sup>[8]</sup>报道了负 $Z_{DR}$ 是垂直定向冰雹贡献, 与Balakrishana<sup>[9]</sup>后散模式计算雹谱最大雹块直径2 cm产生的 $Z_{DR}$ 值相一致。Aydin等<sup>[10]</sup>根据观测事实用模式计算提出, 1.2~4.0 cm冰雹可以产生的 $Z_{DR}$ 值在-0.5 dB或更小。Conway等<sup>[11]</sup>观测到强对流云有明显的 $Z_{DR}$ 回波柱, 高达6 dB的 $Z_{DR}$ 回波柱位于上升气流的后部, 认为这些 $Z_{DR}$ 回波柱可能是冻结层上下暖雨碰并或冰水成物融化形成的滴和悬浮在上升气流上的冷平流所致。在单个主上升气流的雹云中出现的 $Z_{DR}$ 回波柱, 可能对产生冰雹过程是重要的。最近, Carey等<sup>[12]</sup>用偏振雷达观测研究雷暴电时指出, 云闪是与强上升气流顶的霰和冰雹累积有关, 地闪是与霰和冰雹下降改变了负电荷中心高度有关。Lopez等<sup>[13]</sup>用偏振雷达观测雹暴云中微结构与产生闪电过程和

1999-01-08收到, 1999-04-23收到再改稿

\* 国家“九五”攻关项目96-020-01-07, 国家自然科学基金资助项目49975002和中国科学院“西部之光”共同资助

机理时认为, 雹云中霰、霰和冰雹的多少与云闪和地闪次数有关, 提出了冻结层上霰形成的速率对产生云到地闪次数增或减相关。

大量观测事实和理论研究结果表明, 偏振雷达在云和降水物理的应用和研究领域已引起重视, 取得了常规雷达不能获得的结果。本文利用中国科学院兰州高原大气物理研究所 C 波段双线偏振天气雷达, 观测到的 4 例较完整雹暴云的连续  $Z_H$  和  $Z_{DR}-RHI$  回波资料和地面降雹情况, 结合国外观测和研究结果, 分析研究  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  技术对雹云演变的回波特征和识别冰雹的潜在能力。

## 2 偏振雷达原理

雷达回波反射率  $Z_e$  (dBZ) 取决于扫描体积内粒子的相态、大小、分布和定向。雨滴普遍是长轴平行于地面的扁椭球状的, 因此偏振雷达测到的  $Z_H$  回波强度大于  $Z_V$  回波, 即雨的  $Z_{DR}$  值总是大于或等于 0 dB。而强对流雷暴云发展的高度和云动力结构对形成的水成物粒子是极其复杂的。大量观测事实和实验结果都已证明, 雨和冰雹是有差别的, 降雨云的回波反射率普遍比强雷暴云低, 这与降雨云中水滴增长尺度受空气动力影响, 它的变形程度和下落方式受到限制, 所以雨滴的长轴与短轴的比率与其尺度有关。对一般天气雷达波长的后向散射可视雨滴尺度和数浓度加权平均的贡献, 可作为各向异性介质的等效后向散射粒子。相对来说, 冰雹有较大不同, 它是受强烈上升气流将水汽 (小水滴) 输送到较高的高度, 并受到过冷水滴和冰水混合物碰并或吸附, 以及多次反复循环增长形成的, 它的增长尺度不定, 与雹块形状之间没有确定关系, 也不像雨滴有优势定向和排列, 下落的方式是随机的, 多以滚动或翻滚斗运动, 可作为各向同性介质看待, 所以  $Z_{DR}$  值往往小于或等于 0 dB。当冰水混合或冰雹融化和带水膜雹块时, 从雨中区别冰雹造成了困惑, 需要结合  $Z_H$  回波强度来区别。偏振雷达测量的  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  对各向异性 (雨) 和各向同性 (椭球状或翻滚的冰雹) 组成的降水粒子具有不同贡献的影响, 即使全是各向同性的扁椭球状的冰雹, 对  $Z_{DR}$  来说也会与雨滴有所不同, 这与低密度的冰雹有较小的介电常数有关。这些偏振特性经过长期试验观测和理论模式计算研究得到证实。本文就这些结论用我国自己观测资料进行一些探讨研究。

## 3 双线偏振雷达探测强对流雹暴云

在中国科学院兰州高原大气物理研究所研制成功双线偏振雷达的第二年 (1990 年), 雷达各项性能都相对稳定, 8 月份连续跟踪观测到 4 例强雷暴云回波资料。观测先用常规 3 cm 波长雷达定时扫描, 当测到对流单体回波的云顶高度大于 8.0 km, 回波强度  $Z_e > 30$  dBZ, 并持续 10 min, 即用偏振雷达跟踪观测。由于当时采集和处理系统慢, 一个 CAPPI 体积需 15 min, PPI 回波以常规雷达照相为主。偏振雷达以采集 PPI 强回波中心的  $Z_H$  和  $Z_{DR}-RHI$  剖面数字回波资料, 间隔 1 min, 回波资料都观测 20 min 以上。从这 4 例强雷暴演变的回波特征和平凉地区雹暴云活动规律, 分别预测为冰雹云, 经地面实况调查和降雹受灾乡报告, 表明这 4 例强雷暴云都有不同强度降雹。

图 1 (见图版 I) 和图 2 (见图版 II) 是其中 2 例雹云从发展到开始降雹时部分  $Z_H$

和 $Z_{DR}$ -RHI 回波图, 每幅回波的观测时间 (BJT)、方位、距离均在图中给出。从这 2 例雹云不同演变时段 $Z_H$ 与 $Z_{DR}$ 的回波参量和回波结构对应特点, 根据它们地面降雹时间、地点和强度, 我们作以下分析解释。

雹云发展阶段: 强对流单体回波都出现在 4 km 以上 (相对平凉 MSL), 回波顶高达到 7~9 km, 回波中均有 $Z_H \geq 0$  dBZ 和 $Z_{DR} > 2.5$  dB 高值回波中心存在, 见图 1 中 1535 和图 2 中 1602。说明生成雹云的强对流单体回波云顶高和云底在 0℃层以上, 对形成雹云发展十分有利。较强 $Z_H$ 和高值 $Z_{DR}$ 表明, 雹云发展期已有冻滴和冰水混合的大粒生成, 这些粒子或滴可能是由上升气流将低层对流云塔中大水滴输送到较高高度上强单体云中, 受高层环境层结和风切变影响, 在强单体云中形成堆积, 并都位于上升气流入口处的 0℃层附近位置。

雹暴云发展强盛时, 雹云都表现出悬挂体回波结构, 见图 1 中 1537 和 1539 以及图 2 中 1606 和 1608 回波图。这时雹云首先在 7~9 km 高度的悬挂体中心部位出现雹云生命期中最强回波反射率 $Z_H > 50$  dBZ 区, 随后向主云体扩展, 形成明显钩状回波。强 $Z_H > 40$  dBZ 面积占雹云垂直剖面回波一半以上, 并从云底伸展到云顶。 $Z_{DR}$ 回波上, 首先显示最强 $Z_H$ 的悬挂体中心附近都有 $Z_{DR} > 2.5$  dB 值相对应, 较强 $Z_H$ 回波区 (30~40 dBZ) 均与 $Z_{DR}$ 值 1.0~2.0 dB 回波相关。而 4 km 附近 $Z_{DR}$ 回波有明显分界, 4 km 以下强 $Z_H$ 区都有负 $Z_{DR}$ 回波出现, 并随高度下降负 $Z_{DR}$ 值增大。这时负 $Z_{DR}$ 回波高度可达到 5~6 km, 这些小负 $Z_{DR}$ 回波都位于钩状回波的凹口处。根据 $Z_H$ 和 $Z_{DR}$ 回波变化说明, 悬挂体中心强 $Z_H$ 和高 $Z_{DR}$ 值回波区可能是冰雹胚胎源扩散, 导致雹云中层以上都形成冰化 (霰或小冰雹), 造成 $Z_{DR}$ 均是 1.0~2.0 dB 回波区。而低层的负 $Z_{DR}$ 回波可能是从冰雹源增长较大的软雹或冰雹下落融化不完全所致, 它们再被强上升气流携带到中层长成为冰雹。而冻结层附近的高 $Z_{DR}$ 值带是受前侧主强上升气流作用, 携带较大尺度水滴入云后受阻, 被分选滞留在中下层 (0℃层附近), 并与中高层下落的软雹或小冰雹混合的结果。因为它们对应的 $Z_H$ 回波值大于或等于 50 dBZ 区, 而钩状回波区对应的 $Z_H$ 值小于 30 dBZ 区。

雹暴云成熟阶段: 回波面积有明显增大, 主回波体由原上大小, 变成桶状回波形状, 悬挂体变的不明显, 见图 1 中 1541 和图 2 中 1610 回波图。强 $Z_H$ 回波区从中上层向中下层移, 除强回波区仍表现大面积外, 没有明显回波特征表现降雹征兆, 最多以强回波接地为降雹判别依据。在 $Z_{DR}$ 回波有一明显回波特征, 中层以上的所有 $Z_H \geq 30$  dBZ 值回波均对应 1.0 dB 的 $Z_{DR}$ 值回波, 中层 (冻结层附近) 3~5 km 高度上有一层 $Z_{DR} \geq 3.5$  dB 高值回波带, 在这高 $Z_{DR}$ 值回波层下是负 $Z_{DR}$ 回波区。负 $Z_{DR}$ 回波从原 5 km 下降到 3 km 左右。对照 $Z_H$ 回波分析, 雹云成熟阶段, 中层以上都已是冰相化的大水成物粒子区, 强 $Z_H$ 回波 (50 dBZ) 对应的 $Z_{DR}$ 值区可能是大尺度的冰雹和带水膜雹块, 较强 $Z_H$ 回波 (30~40 dBZ) 的 $Z_{DR}$ 区是软雹和冰雪团, 弱 $Z_H$ 回波 (<30 dBZ) 的 $Z_{DR}$ 区主要在雹云的边缘, 是由不同定向的冰晶和雪花组成。

雹暴云降雹阶段: 雹云回波结构没有大变化, 见图 1 中 1543 和 1545 以及图 2 中 1612 和 1614 回波图。强 $Z_H$ 回波逐渐下移并减弱, 这时 $Z_{DR}$ 回波上有十分清晰回波特点, 原在主云体前侧的负回波区从 3~4 km 下降到 2 km, 负 $Z_{DR}$ 回波区中间被临界 $Z_{DR}$ 值 (0.1 dB) 的回波柱分隔成前侧和后侧, 并且前侧的负 $Z_{DR}$ 回波很快消失, 而后

侧负 $Z_{DR}$ 回波区可以维持几分钟时间。我们认为雹云主云体回波墙处的负 $Z_{DR}$ 区很可能是高速下落的大雹块。在这临界 $Z_{DR}$ 值回波柱上约2 km厚的高 $Z_{DR}$ 值大于3.5 dB层覆盖在上部, 这种差分反射率回波柱在近几年国外也有类似观测结果, 并以此作为识别降雹的依据。在相隔1~2 min的回波上, 低层的负 $Z_{DR}$ 回波区被临界值回波区补充, 并将负 $Z_{DR}$ 区推向云底的后侧(推测可能地面有大规模密集中小雹块夹雨降落)。之后, 负 $Z_{DR}$ 回波消失, 云底被高 $Z_{DR}$ 值层代替。在中层(0℃层附近)又形成新的高值 $Z_{DR}$ 回波带, 但其下部很少有负 $Z_{DR}$ 值回波区再出现。根据这两例雹云地面降雹时间地点与临界 $Z_{DR}$ 值回波柱的距离相符。不同的是1543负 $Z_{DR}$ 回波下对应位置有短时雷雨而降大冰雹, 雹块直径普遍有2~3 cm, 而1614负 $Z_{DR}$ 回波下的地点降短时雷阵雨而降特大冰雹, 雹块直径有2~4 cm左右, 并且持续较长时间降雨夹雹。结合 $Z_H$ 回波可看出, 1541雹云的负 $Z_{DR}$ 回波位置对应的是小于或等于40 dBZ, 并不是最强 $Z_H$ 回波区。而1612雹云的 $Z_{DR}$ 回波对应的是 $Z_H \geq 50$  dBZ回波区, 云底前侧的负 $Z_{DR}$ 区维持时间长。这些观测事实说明,  $Z_{DR}$ 和 $Z_H$ 结合对定量判断降雹或降雹时间、地点及降雹强度是有用的信息。

从上2例雹云演变过程的 $Z_H$ 和 $Z_{DR}$ 回波参量和结构变化特点说明,  $Z_H$ 回波强度对雹暴云结构有明显的指示, 尤其对雹云发展旺盛阶段的回波结构特征, 但对预测降雹地点和时间没有表现出特定回波信息。 $Z_{DR}$ 回波对雹暴云模型结构不象 $Z_H$ 回波那样, 但 $Z_{DR}$ 值对判断雹云不同阶段云内粒子演化状态, 特别在降雹前后冻结层附近的 $Z_{DR}$ 回波特征变化有明显的反映, 这些回波信息可能对准确预测降雹是有用的判据。

## 4 雹暴云 $Z_H$ 和 $Z_{DR}$ 回波特征分析

根据以上2例雹云演变过程的 $Z_H$ 和 $Z_{DR}$ -RHI回波参量和偏振特性, 我们用4例雹云回波资料进行以下几点分析讨论。

### 4.1 雹云的 $Z_H$ 与 $Z_{DR}$ 回波分布关系

图3a是4例雹云回波资料 $Z_H$ 与 $Z_{DR}$ 各高度层平均值关系的分散图。从它们对应不同值区间可看出, 冰雹云的 $Z_H$ - $Z_{DR}$ 分布是很分散的, 强 $Z_H$ 回波区对应 $Z_{DR}$ 值有相当宽的范围, 从-3.0~5.0 dB, 中等强 $Z_H$ 回波区对应 $Z_{DR}$ 值在0~4.0 dB区。尤其是强雹云平均 $Z_H$ 值在30~50 dBZ区间有较多的负 $Z_{DR}$ 值(0~2.0 dB), 而弱雹云在25~40 dBZ区只有少的小负 $Z_{DR}$ 值(0~1.0 dB)出现。这种 $Z_H$ 与 $Z_{DR}$ 回波值成反相关的特点, 为我们用 $Z_H$ 和 $Z_{DR}$ 双参数技术识别冰雹是有用的信息。从图1和图2回波可知, 负 $Z_{DR}$ 值回波多出现在雹云低层, 说明雹暴云中有大水成物粒子(冰雹)下落引起的偏振特性有关。图3b中给出了112次不同降雨类型雨滴谱的 $Z_H$ - $Z_{DR}$ 平面分布和边界关系。对比说明, 雹云回波中强 $Z_H$ 值区有较多负 $Z_{DR}$ 回波, 并且在强 $Z_H$ 回波区对应的高 $Z_{DR}$ 值也比降雨的多, 这是降雨云不可能出现的。

图4a是这4例雹云的 $Z_H$ 和 $Z_{DR}$ 各有13 985个数字回波体积值(2 km×1 km)的平均值曲线, 和它们用图3b中雷阵雨雨滴谱的 $Z_H$ - $Z_{DR}$ 分布边界函数

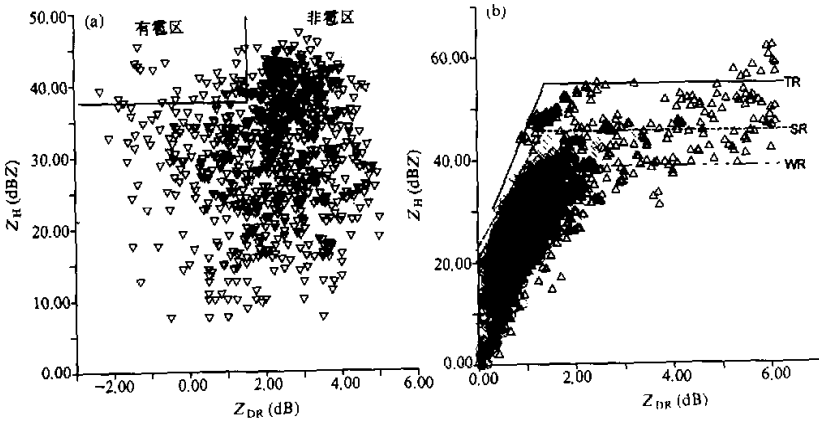


图3 (a) 4例雹云各高层平均回波值的 $Z_H$ 与 $Z_{DR}$ 对应关系和拟合结果; (b) 112次不同降雨 (TR) 雨滴谱的 $Z_H - Z_{DR}$ 平面分布。TR是雷阵雨, SR是阵雨, WR是大范围降雨

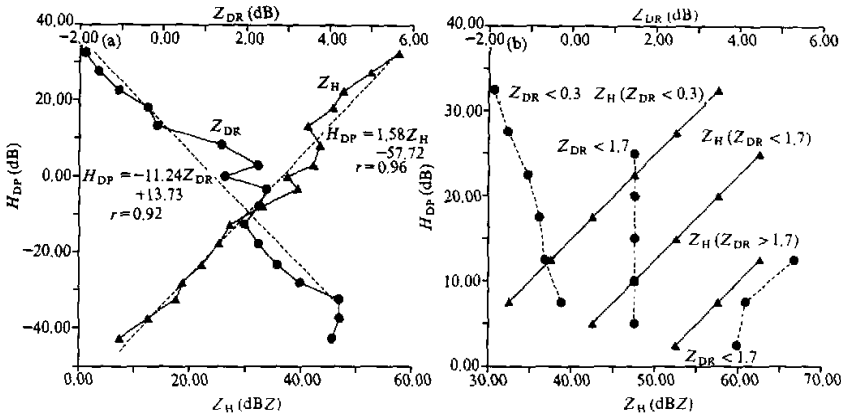


图4 (a) 4例雹云回波的 $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 平均值与 $H_{DP}$ 的关系; (b) 有冰雹回波中不同 $Z_{DR}$ 回波区域所对应的 $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 值与出现冰雹信号 $H_{DP}$ 值的关系

$$F_{雨}(Z_{DR}) = \begin{cases} 25.4, & Z_{DR} < 0.3 \\ 25.4 - 1.7Z_{DR}, & 0.3 < Z_{DR} < 1.7 \\ 55.0, & Z_{DR} > 1.7 \end{cases} \quad (1)$$

计算得到雹云与雷雨云有不同 $Z_H$ 和 $Z_{DR}$ 回波分布区域来识别冰雹信息 $H_{DP}$ 的关系:

$$H_{DP} = Z_H - F_{雨}(Z_{DR}). \quad (2)$$

当 $H_{DP} > 0$ 作为出现冰雹的信息。可以看出大量雹云回波的 $Z_H$ 与 $Z_{DR}$ 随 $H_{DP}$ 是线性相关的, 在 $H_{DP} > 0$ 区 $Z_{DR}$ 值随着 $Z_H$ 值增大而减小, 在 $H_{DP} < 0$ 区反之。拟合结果表明 $H_{DP} > 0$ 出现冰雹的 $Z_{DR}$ 值小于1.0 dB,  $Z_H$ 值至少大于38 dBZ, 而 $H_{DP} < 0$ 非冰雹的





别, 并且出现冰雹信号 $H_{DP}$ 强度也不同。高 $Z_{DR}$ 值大于 1.7 dB 区与强 $Z_H$ 区成正相关,  $H_{DP}$ 值小频率低。低或负 $Z_{DR}$ 值小于 0.3 dB 区与 $Z_H$ 值区成反相关,  $H_{DP}$ 值大频率高。而  $0.3 < Z_{DR} < 1.7$  dB 值区 $H_{DP} > 0$ 的频率最低。这些负或小 $Z_{DR}$ 值区占到雹云中总冰雹出现信号( $H_{DP} > 0$ )频率的 62%, 并且出现冰雹信号 $H_{DP}$ 值高。这说明用偏振雷达探测冰雹云要特别注意在较强 $Z_H$ 附近负或接近零 $Z_{DR}$ 值回波区的变化, 这可能是大的干雹块下落时滚动引起的结果。从图 1 和图 2 中 $Z_{DR}$ -RHI 回波表明, 负和小 $Z_{DR}$ 值回波区主要在 4 km 以下, 降雹时 $Z_H$ 值偏低的。同时说明偏振雷达的 $Z_{DR}$ 测量精度要高, 误差应小于 0.2 dB。

图 5a 是表 1 中不同 $Z_H$ 回波和 $H_{DP} > 0$ 的频率分布, 可以清楚看到, 用常规雷达或偏振雷达探测冰雹,  $Z_H > 50$  dBZ 是出现冰雹的阈值, 这与国内外判别指标是一致的, 但当 $Z_H < 50$  dBZ 回波区是雨雹混合区中有 60%冰雹出现频率用常规雷达很难区别, 用偏振雷达可以测到。特别对较低 $Z_H$ 区在 $Z_{DR}$ 值小或负范围, 当 $Z_H$ 值大于 38 dBZ,  $Z_{DR} < 1.0$  (dB) 的 $H_{DP} \geq 5$ 是可以作为判断冰雹指标。图 1 和图 2 观测事实说明, 具有大 $Z_{DR}$ 值的强 $Z_H$ 回波区在中高层上, 可能是增长过程湿雹或大冰雹等大粒子的强反射率回波, 而负和接近零 $Z_{DR}$ 值的较强 $Z_H$ 回波区主要在中下层, 可能是下落干的或垂直定向冰雹和软雹等水成物, 这与国内外大量观测事实和理论研究结论相符。

图 5b 是这些雹云不同 $Z_{DR}$ 回波与 $H_{DP} > 0$ 的值的频率分布关系。可看到雹云 $Z_{DR}$ 回波值出现频率主要在-0.5~2.5 dB 之间, 负 $Z_{DR}$ 回波值频率只占到约 10%, 正 $Z_{DR}$ 回波值有 90%以上。负 $Z_{DR}$ 值区出现冰雹信号强 $H_{DP} \geq 15$ , 频率高。正 $Z_{DR}$ 值区出现冰雹信号 $H_{DP}$ 值小频率低, 与表 1 相同。在 $Z_{DR}$ 临界-0.5~0.5 值范围是主要出现冰雹区, 也是雨雹混合的, 用 $Z_H > 38$  dBZ,  $Z_{DR} < 1.0$  dB 指标并结合不同 $Z_{DR}$ 值区间出现冰雹 $H_{DP}$ 值是可以判别降雹的。不同 $Z_{DR}$ 值区间出现冰雹 $H_{DP}$ 值在表 2 中列出, 不再分析。

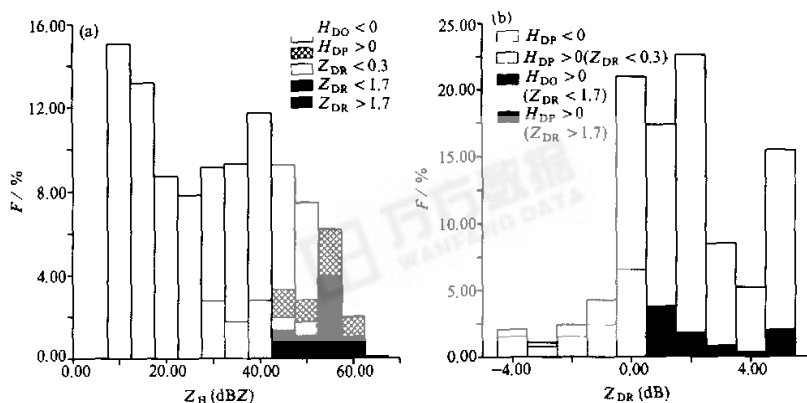


图 5 (a) 冰雹云 $Z_H$ 回波值出现频率分布和对应不同 $Z_{DR}$ 区间出现冰雹信号 $H_{DP}$ 的分布;  
(b) 冰雹云 $Z_{DR}$ 回波值出现频率分布和对应不同 $Z_{DR}$ 区间出现冰雹信号 $H_{DP}$ 的分布 (b)

表 2 冰雹云不同 $Z_{DR}$  回波值出现频率与对应的 $Z_H$  和出现冰雹信号 $H_{DP}$  关系

| $Z_{DR}$ (dB) | I         |                  |                | II           |                  |                | III                                |                  |                | IV                                       |                  |                | V                                  |                  |                |
|---------------|-----------|------------------|----------------|--------------|------------------|----------------|------------------------------------|------------------|----------------|------------------------------------------|------------------|----------------|------------------------------------|------------------|----------------|
|               | 实测各参量     |                  |                | $H_{DP} > 0$ |                  |                | $Z_{DR} < 0.3$<br>( $H_{DP} > 0$ ) |                  |                | $0.3 < Z_{DR} < 1.7$<br>( $H_{DP} > 0$ ) |                  |                | $Z_{DR} > 1.7$<br>( $H_{DP} > 0$ ) |                  |                |
|               | 频率<br>(%) | $H_{DP}$<br>(dB) | $Z_H$<br>(dBZ) | 频率<br>(%)    | $H_{DP}$<br>(dB) | $Z_H$<br>(dBZ) | 频率<br>(%)                          | $H_{DP}$<br>(dB) | $Z_H$<br>(dBZ) | 频率<br>(%)                                | $H_{DP}$<br>(dB) | $Z_H$<br>(dBZ) | 频率<br>(%)                          | $H_{DP}$<br>(dB) | $Z_H$<br>(dBZ) |
| -3.5          | 2.08      | 12.83            | 37.83          | 1.57         | 21.18            | 46.18          | 1.57                               | 21.18            | 46.18          | -                                        | -                | -              | -                                  | -                | -              |
| -2.5          | 1.09      | 8.72             | 33.72          | 0.79         | 17.64            | 42.64          | 0.79                               | 17.64            | 42.64          | -                                        | -                | -              | -                                  | -                | -              |
| -1.5          | 2.40      | 6.07             | 31.07          | 1.52         | 17.83            | 42.83          | 1.52                               | 17.82            | 42.83          | -                                        | -                | -              | -                                  | -                | -              |
| -0.5          | 4.29      | 4.18             | 29.18          | 2.42         | 15.80            | 40.80          | 2.42                               | 15.80            | 40.80          | -                                        | -                | -              | -                                  | -                | -              |
| 0.5           | 20.98     | -6.30            | 18.70          | 6.58         | 10.37            | 35.37          | -                                  | -                | -              | -                                        | -                | -              | -                                  | -                | -              |
| 1.5           | 17.36     | -9.55            | 27.95          | 3.84         | 10.77            | 48.27          | -                                  | -                | -              | 3.88                                     | 10.77            | 44.14          | -                                  | -                | -              |
| 2.5           | 22.60     | -16.93           | 33.07          | 1.84         | 3.51             | 53.51          | -                                  | -                | -              | -                                        | -                | -              | 1.84                               | 3.51             | 53.51          |
| 3.5           | 8.49      | -19.76           | 30.24          | 0.84         | 3.33             | 53.26          | -                                  | -                | -              | -                                        | -                | -              | 0.84                               | 3.27             | 53.27          |
| 4.5           | 5.21      | -22.21           | 27.79          | 0.32         | 3.61             | 53.61          | -                                  | -                | -              | -                                        | -                | -              | 0.32                               | 3.61             | 53.61          |
| 5.5           | 15.47     | -20.80           | 29.20          | 2.07         | 4.02             | 54.02          | -                                  | -                | -              | -                                        | -                | -              | 2.07                               | 4.02             | 54.02          |
| $Z_{DR} < 0$  | 9.88      | 6.98             | 31.97          | 6.30         | 17.86            | 42.86          | 6.30                               | 17.86            | 42.86          | -                                        | -                | -              | -                                  | -                | -              |
| $Z_{DR} > 0$  | 90.12     | -14.27           | 27.50          | 15.48        | 8.28             | 44.56          | 6.58                               | 10.36            | 35.37          | 3.84                                     | 10.77            | 48.27          | 5.06                               | 3.69             | 53.69          |
| -1.5~0.5      | 6.70      | 4.86             | 29.86          | 3.95         | 16.59            | 41.59          | 3.94                               | 16.59            | 41.59          | -                                        | -                | -              | -                                  | -                | -              |
| -0.5~0.5      | 25.29     | -4.53            | 20.47          | 9.00         | 11.83            | 36.84          | 9.00                               | 11.83            | 36.84          | -                                        | -                | -              | -                                  | -                | -              |
| 0.5~1.5       | 38.36     | -7.77            | 22.89          | 10.42        | 10.52            | 35.37          | 6.58                               | 10.36            | 35.37          | -                                        | -                | -              | -                                  | -                | -              |

5  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$  双参数技术判别冰雹

结合以上 4 例雹云回波分析和它们不同 $Z_H$  和 $Z_{DR}$  值（表 1、表 2）对应关系与出现冰雹信号 $H_{DP}$  的结果表明，用偏振雷达双参数技术判别降雹要比常规雷达单一参数 $Z_H$ （或 $Z_e$ ）>45 dBZ 探测冰雹的识别率提高 38%。从表 1 的第 I 栏和第 II 栏 $Z_H \leq 47.5$  dBZ 比较说明，常规雷达用 $Z_H > 45$  dBZ 探测冰雹仍会有 28%的不确定性，用双参数 $Z_H > 38$  dBZ， $Z_{DR} < 1.0$  dB 指标可以判断出降雹，并对发展强盛雷暴云回波 $Z_H \geq 45$  dBZ，有负 $Z_{DR}$  和很高 $Z_{DR}$  值出现时，可以根据该指标结合 $H_{DP}$  的值大小来预测冰雹或非雨类大粒子。为了验证这些结果，图 6a 给出了不同 $H_{DP}$  值频率与用 $Z_H$ ， $Z_{DR}$  预测冰雹出现的关系。可看出，这 4 例雹云回波中出现冰雹信号 $H_{DP} > 0$  占到 21.79%，78%以上是云雨回波区。在 $H_{DP} > 0$  区域， $H_{DP}$  值大小与 $Z_{DR}$  值相关，结合以上分析，说明强 $Z_H$  对应高 $Z_{DR}$  值的 $H_{DP}$  值并不大，而负或小 $Z_{DR}$  值的 $H_{DP}$  值大，这说明降雹阶段雹云底层是冰雹，而发展阶段雹云中上层出现的强 $Z_H$  和高 $Z_{DR}$  回波中心仅是临界出现冰雹信号，可能是增长的软雹和大湿冰雹等，可以作为预测冰雹的信息。

图 6b 是雹云不同高度层上出现冰雹信号的分布，可看出， $H_{DP} > 0$  出现冰雹的频率随高度明显减少，4 km 以上 $H_{DP} > 0$  出现冰雹频率约有 8.01%，占到总冰雹出现率的 37%，而 4 km 以下达到 13.78%，占到总冰雹出现率的 63%（见图中斜杠区）。用双参数指标预测识别降雹也在 4 km 以下 $H_{DP} > 0$  中（见图中浅灰区），其中 78%是在负和低 $Z_{DR}$  值回波区，并且出现冰雹信号值 $H_{DP} \geq 10$ （见图 6b 中深灰区）。结合图 6a



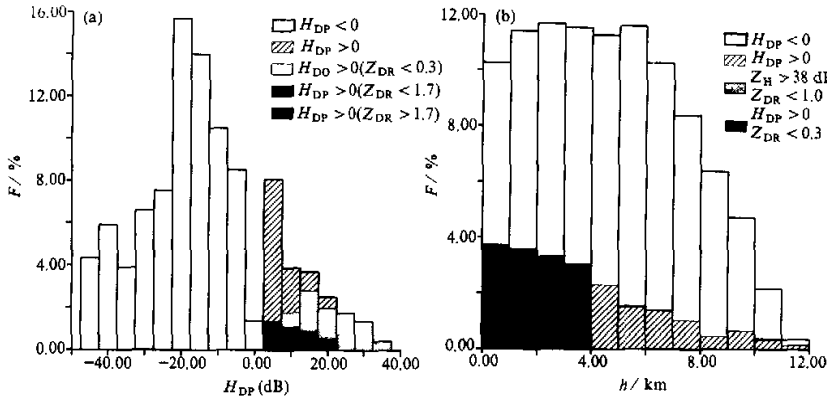


图 6 (a) 出现冰雹信号  $H_{DP}$  值的分布频率和对应不同  $Z_{DR}$  区间与  $H_{DP}$  值的关系; (b) 冰雹云不同高度上出现冰雹信号  $H_{DP}$  值的分布频率和用双参量预测降雹与不同  $Z_{DR}$  区间出现冰雹的关系

可知这些负和低  $Z_{DR}$  值回波区的  $H_{DP}$  值大, 相对高  $Z_{DR}$  值区出现冰雹的可能性更大。表 3 中给出了这些雹云不同高度各参量值, 说明雹云各高度层的回波参量是雨雹混合的, 产生冰雹的回波信息随高度下降频率增加  $H_{DP}$  值增强,  $Z_H$  回波值并不是最强,  $Z_{DR}$  回波值是小或负的, 而强  $Z_H$  回波值在 6~9 km, 对应  $Z_{DR}$  回波值要大于或等于 2.0 dB (表 3 中第 II 栏), 这些可以从表 3 中第 III、IV 栏雹云各高度层有不同  $Z_{DR}$  值区间出现  $H_{DP} > 0$  和对应的各参量值来表明。用双参数  $Z_H > 38 \text{ dBZ}$ 、 $Z_{DR} < 1.0 \text{ dB}$

表 3 冰雹云不同高度层上  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$  平均值与  $H_{DP}$  ( $< 0$  和  $> 0$ ) 值的频率分布

| 高度<br>(km) | I         |                |                  |                  | II           |                |                  |                  | III                                |                |                  | IV                                       |                |                  | V                                  |                |                  |
|------------|-----------|----------------|------------------|------------------|--------------|----------------|------------------|------------------|------------------------------------|----------------|------------------|------------------------------------------|----------------|------------------|------------------------------------|----------------|------------------|
|            | 各参量       |                |                  |                  | $H_{DP} > 0$ |                |                  |                  | $Z_{DR} < 0.3$<br>( $H_{DP} > 0$ ) |                |                  | $0.3 < Z_{DR} < 1.7$<br>( $H_{DP} > 0$ ) |                |                  | $Z_{DR} > 1.7$<br>( $H_{DP} > 0$ ) |                |                  |
|            | 频率<br>(%) | $Z_H$<br>(dBZ) | $Z_{DR}$<br>(dB) | $H_{DP}$<br>(dB) | 频率<br>(%)    | $Z_H$<br>(dBZ) | $Z_{DR}$<br>(dB) | $H_{DP}$<br>(dB) | 频率<br>(%)                          | $Z_H$<br>(dBZ) | $Z_{DR}$<br>(dB) | 频率<br>(%)                                | $Z_H$<br>(dBZ) | $Z_{DR}$<br>(dB) | 频率<br>(%)                          | $Z_H$<br>(dBZ) | $Z_{DR}$<br>(dB) |
| 12         | 0.36      | 24.3           | 1.72             | -9.1             | 0.16         | 31.8           | 1.37             | 2.5              | 0.14                               | 27.5           | 0.50             | 2.5                                      | -              | -                | -                                  | 0.02           | 52.5             |
| 11         | 2.18      | 22.0           | 1.97             | -16.0            | 0.41         | 31.0           | 1.20             | 2.5              | 0.35                               | 27.7           | 0.50             | 2.5                                      | -              | -                | -                                  | 0.06           | 52.5             |
| 10         | 4.71      | 22.7           | 2.10             | -16.6            | 0.66         | 38.0           | 2.40             | 2.7              | 0.38                               | 27.5           | 0.50             | 2.5                                      | 0.02           | 42.5             | 1.5                                | 5.0            | 0.26             |
| 9          | 6.38      | 23.8           | 2.34             | -18.6            | 0.45         | 49.0           | 2.24             | 6.2              | 0.06                               | 31.3           | 0.50             | 6.3                                      | 0.14           | 48.3             | 1.5                                | 10.8           | 0.25             |
| 8          | 8.27      | 27.0           | 2.56             | -16.3            | 1.03         | 46.7           | 2.18             | 5.9              | 0.24                               | 31.0           | 0.47             | 6.0                                      | 0.29           | 47.9             | 1.5                                | 10.4           | 0.51             |
| 7          | 10.27     | 28.7           | 2.66             | -15.1            | 1.42         | 49.5           | 2.33             | 7.2              | 0.10                               | 30.0           | 0.36             | 5.0                                      | 0.67           | 48.4             | 1.5                                | 10.9           | 0.64             |
| 6          | 11.59     | 29.2           | 2.54             | -14.2            | 1.55         | 50.0           | 2.41             | 7.7              | 0.17                               | 38.1           | 0.17             | 13.1                                     | 0.61           | 47.9             | 1.5                                | 10.4           | 0.77             |
| 5          | 11.26     | 30.4           | 2.54             | -12.5            | 2.31         | 46.0           | 1.63             | 9.8              | 0.96                               | 37.5           | -0.04            | 12.5                                     | 0.62           | 50.3             | 1.5                                | 12.8           | 0.73             |
| 4          | 11.53     | 29.7           | 2.56             | -12.0            | 3.08         | 44.8           | 1.06             | 9.5              | 1.36                               | 37.8           | -1.07            | 12.8                                     | 0.93           | 47.3             | 1.5                                | 9.8            | 0.79             |
| 3          | 11.67     | 28.0           | 1.90             | -8.8             | 3.36         | 44.0           | 0.72             | 12.3             | 2.35                               | 40.1           | -0.63            | 15.1                                     | 0.24           | 50.9             | 1.5                                | 13.4           | 0.77             |
| 2          | 11.41     | 26.1           | 0.92             | -7.2             | 3.60         | 42.0           | -0.58            | 15.7             | 3.32                               | 41.4           | -0.84            | 16.4                                     | 0.19           | 46.3             | 1.5                                | 8.5            | 0.09             |
| 1          | 10.27     | 30.3           | 1.64             | -6.0             | 3.74         | 41.5           | -0.41            | 15.1             | 3.46                               | 40.8           | -0.73            | 15.8                                     | 0.12           | 46.3             | 1.5                                | 8.8            | 0.15             |
| $\leq 5$   | 56.14     | 28.8           | 1.92             | -9.4             | 16.03        | 43.3           | 0.34             | 12.8             | 11.15                              | 40.2           | -0.72            | 15.2                                     | 2.10           | 48.5             | 1.5                                | 11.0           | 2.48             |
| $> 5$      | 55.12     | 27.5           | 2.48             | -15.1            | 7.98         | 45.9           | 2.05             | 7.1              | 2.39                               | 32.8           | 2.51             | 7.8                                      | 2.36           | 48.7             | 1.5                                | 11.1           | 3.24             |

指标预测说明实际出现冰雹是 5 km 以下, 其中约 22% 可能于我们雷达数字采集回波的  $Z_{DR}$  分辨率 1.0 dB 间隔有关, 被  $Z_{DR} > 0.3$  dB 区淹没有关。

## 6 结论

通过以上 4 例雹暴云不同演变过程  $Z_H$  和  $Z_{DR}$ -RHI 回波参量和偏振特征的分析说明, 偏振雷达观测的  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$  双参量技术对识别冰雹有着显著的优势。主要结果有:

(1)  $Z_{DR}$ 、 $Z_H$  回波对生成雹云早期回波特点有诊断价值, 尤其对发展的强对流单体中所含水成物可以提供分析研究。(2)  $Z_{DR}$ 、 $Z_H$  回波对雹云发展旺盛期的回波结构和特征有明显征兆, 冻结层以上  $Z_H$  强回波与正高  $Z_{DR}$  值成正比, 以下与低层负  $Z_{DR}$  值成反比, 0℃ 层附近有明显的高  $Z_{DR}$  值回波带出现。(3)  $Z_{DR}$ 、 $Z_H$  回波对降雹前后有明显回波信息, 低层负  $Z_{DR}$  回波中有正  $Z_{DR}$  值回波柱, 是判断降雹有用的信息。(4) 用  $Z_H > 38$  dBZ,  $Z_{DR} < 1.0$  dB 双参量指标可以判别降雹, 并且当出现冰雹信号值  $H_{DP} \geq 10$  时可以定量识别冰雹的准确率达到 78%。

致谢: 本文用到的偏振雷达资料有徐宝祥研究员参加观测, 地面降雹资料由平凉市农业局马晓峰等和平凉地区气象局陈应元等提供, 在此谨表感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Atlas, D., *Radar in Meteorology*, Amer. Meteor. Soc., Boston, 1990, 153~191.
- 2 Selige, T. A. and V. N. Bringi, Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation, *J. Appl. Meteor.*, 1976, 15, 69~76.
- 3 Jameson, A. R., Micorophysical interpretation of Miltiparameter radar measurments in rain, Part 1: Interpretation of polarization measerments and estimation of raindrop shapes, *J. Atmos. Sci.*, 1983, 40, 1792~1802.
- 4 Bringi, V. N., T. A. Seliga and S. M. Cherry, Statistical properties of the dual polarization differential reflectivity ( $Z_{DR}$ ) hail signal, *IEEE Trans. Geosci. Remonte Sens.*, 1983, 21, 215~220.
- 5 Aydin, K., T. A. seliga and V. Balaji, Remonye sensing og hail with a dual linear polarization radar, *J. Climate Appl. Meteor.*, 1986, 25, 1475~1484.
- 6 Knight, N. C., Hailstone shape factor and its relation to radar interpretation to hail, *J. Climate Appl. Meteor.*, 1986, 25, 1956~1958.
- 7 Illingworth, A. J., W. F. Gooddard and S. M. Cherry, Polarizatiob radar studies of precipitation development in convective storms, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1987, 113, 469~489.
- 8 Bringi, V. N., J. Vivekanandan and J. D. Tuttle, Multiparameter radar measurement in Colorado convective storms, Part 2: Hail detection studies, *J. Atmos. Sci.*, 1986, 43, 2564~2577.
- 9 Balakrishnan, N. and D. S. Zrinic, Estimation of rain and hail rates in mixed-phase precipitation, *J. Atmos. Sci.*, 1990, 47, 565~585.
- 10 Lopez, K. and Yang Zhao, A computational study of polarization radar observable in hail, *IEEE Trans. Geosci. Remonte Sens.*, 1990, 28, 412~422.
- 11 Conway, J. W., D. S. Zrinic, A study of embryo production and hail growth using dual-Doppler and multiparameter radar, *Mon. Wea. Rev.*, 1993, 12, 2511~2527.
- 12 Carey, L. D. and S. A. Rutledge, A multiparameter radar case study of the microphysical evolution of a lightning storm, *J. Meteorol. Atmos. Phys.*, 1996, 59, 33~64.
- 13 Lopez, R. E. and J. P. Rubagnac, The lightning activity of a hailstorm as a function of changes in micophysical characteristics inferred from polarization radar observation, *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(D14), 16799~16813.

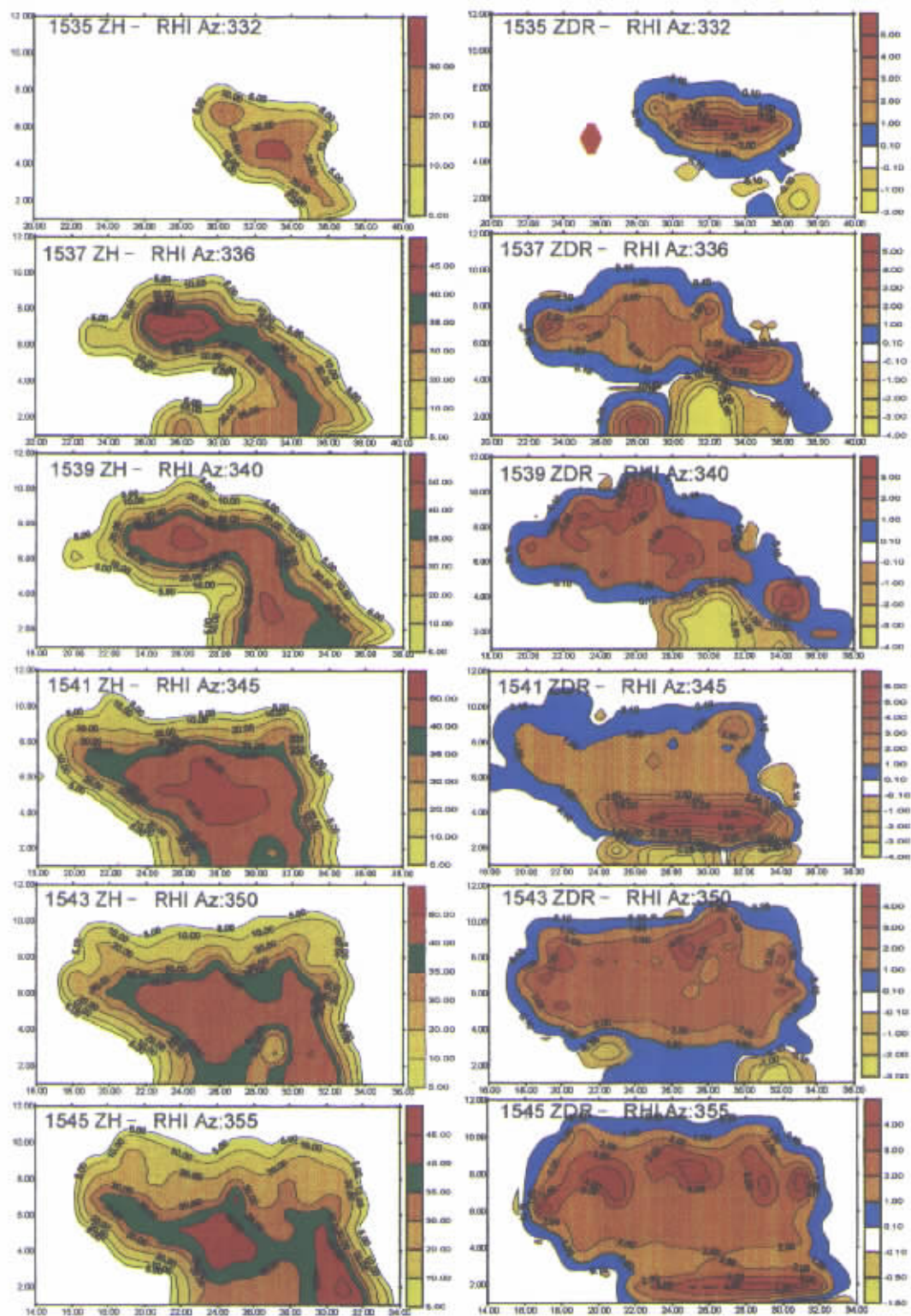
## Polarization Radar Observations on Hailstorms

Zhang Hongfa, Qie Xiushu, Wang Zhijun and Zhang Yijue

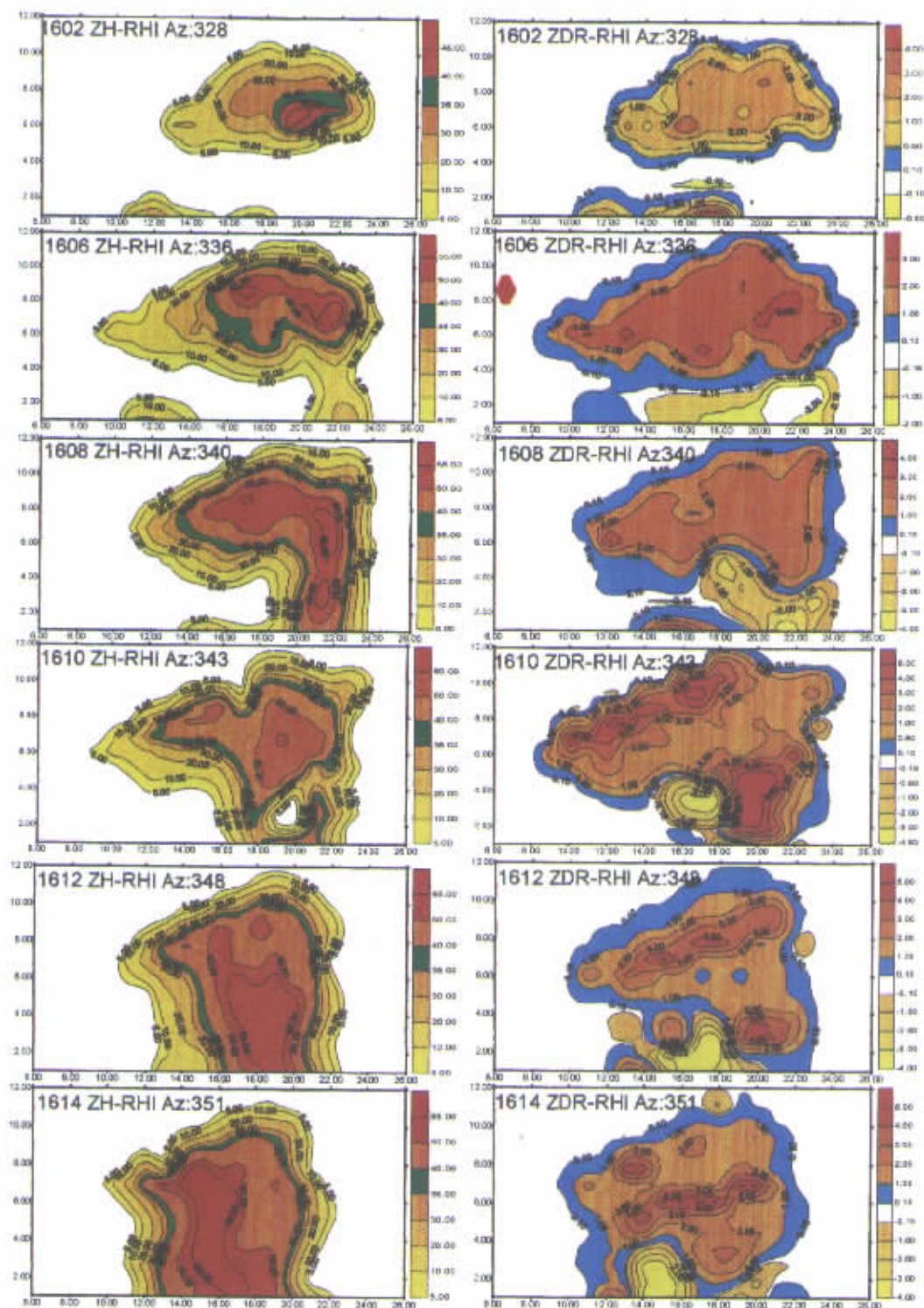
(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,  
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

**Abstract** Detailed echo information of horizontal reflectivity  $Z_H$  and differential reflectivity  $Z_{DR}$  were obtained by C-band dual linear polarization weather radar observations of four hailstorms in evolution process in August 1990. And based on polarization radar principles, we have analysed these echo parameters and polarization characteristic in their different evolution stages, and found  $Z_{DR}$  echo column is a distinct echo signature for discriminating fallhails. We have also used  $Z_H$  and  $Z_{DR}$  dual parameters technique to identify hails from mixed rains and hails, and analysis the results.

**Key words:** sever convective hailstorm; polarization property; differential reflectivity;  $Z_{DR}$  echo column identify

图 1 1990 年 8 月 9 日 15:34~15:54 观测到雹暴云演变过程中  $Z_H$  和  $RHI$  回波图



图2 1990年8月9日16:00~16:23观测到雹暴云演变过程中 $Z_H$ 和RHI回波图