

冰雹指数产品剖析及在灾害性 强降水预报中的应用

邵玲玲¹ 黄宁立¹ 王倩怡² 江旭东¹ 邱黎华¹

(1. 上海中心气象台, 上海 200030; 2. 南京大学大气科学系)

提 要: 深入研究了新一代天气雷达产品——冰雹指数的算法 HDA, 并分析讨论了算法的早期版本 (7.0) 和改进版本 (10.0) 的设计思路和优缺点, 指出冰雹探测算法的思路与预报局地暴雨的思路相似, 都是建立在对风暴单体中高反射率因子探测的基础上。据此, 首次提出根据不同季节, 利用冰雹指数预报灾害性强降水 (冰雹和局地暴雨) 的设想。通过对大量强降水个例中冰雹指数 HI 、垂直液态水含量 VIL 等雷达产品的统计分析和研究, 总结了利用冰雹指数预报上海地区灾害性强降水的一些基本方法和算法阈值设置, 以期为预报业务部门更好地使用新一代天气雷达导出产品提供一些参考信息。

关键词: 多普勒雷达 冰雹指数 算法 灾害性强降水

Analysis of Hail Index and Its Application to Nowcasting of Rainstorm

Shao Lingling¹ Huang Ningli¹ Wang Qianyi² Jiang Xudong¹ Qiu Lihua¹

(1. Shanghai Meteorological Center, Shanghai 200030;

2. Department of Atmospheric Science, Nanjing University)

Abstract: The hail detection algorithm (HDA) of the CINRAD is investigated, and design features of algorithm in early (7.0) and advanced editions (10.0) are analyzed. The results show that the thinking of HDA is analogous with that of nowcasting of the rainstorm, and both of them are based on the detection of high reflectivity factor in storm cells. The tentative plan of nowcasting disastrous precipitation (hail and local rainstorm) is first put forward

using the hail index (*HI*) on the basis of different seasons. By means of statistical analysis and research of *HI* and *VIL* etc radar products, some basic methods and establishment of algorithm threshold on forecasting disastrous precipitation are summarized in a number of cases, and so as to provide referential messages for forecasters to use the products of the CIN-RAD.

Key Words: doppler radar hail index (*HI*) algorithm disastrous precipitation

引 言

新一代天气雷达的冰雹探测算法 HDA (Hail Detection Algorithm) 是通过寻找风暴单体中冻结层之上的高反射率因子以获得导出产品—冰雹指数 $HI^{[1]}$ 。美国的气象学家最早提出这一概念主要是为了对冰雹天气的临近预报提供一些帮助, 并进行了算法的研究和改进, 希望在不依赖于风暴单体的类型、倾斜度和回波悬垂状的探测, 即在不需要了解单体微观结构的情况下估算风暴单体中冰雹发生的概率。算法的导出产品是冰雹指数 HI (Hail Index), 包括冰雹概率 P_{OH} (Probability of Hail)、强冰雹概率 P_{OSH} (Probability of Severe Hail) 和最大可能的冰雹尺寸 S_{MEH} (Maximum Expected Hail Size)。

上海地区的降雹天气并不多见, 在我们统计的 2000—2004 年五年间总共出现冰雹天气仅 7 次, 可是冰雹指数产品在回波图上显现的频率却相对较高。因此, 在实际预报业务中, 直接利用冰雹指数 HI 预报冰雹天气往往会出现空报或者实际降雹比预报的冰雹尺寸小的现象。同时我们发现, 冰雹指数与局地灾害性强降水有较好的相关性, 特别是在梅雨期和盛夏季节, 冰雹指数产品往往反映了短时灾害性强降水 ($R_{实} \geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 和特强降水 ($R_{实} \geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 过程^[2]。本文探讨出现这种现象的原因, 期望改善冰雹天气的预报准确率并进一步了解

冰雹指数与灾害性强降水的相关关系, 扩展新一代天气雷达冰雹指数产品的应用范围。

1 冰雹探测算法和冰雹指数

1.1 算法的早期版本

在 HDA 早期版本中的算法设置和流程, 是根据美国 Lemen 教授的强冰雹识别理论, 选取代表风暴三维结构的 7 个指示性因子^[3], 即最高可探测风暴高度大于当地零度层高度 (权重值 17); 风暴体内最大反射率因子大于 55dBz (权重值 15); 中层风暴最大反射率因子大于 50dBz (权重值 20); 最低层风暴的中心位于其上各层风暴的中心后侧 (权重值 7); 风暴中层倾斜方向在风暴运动方向的右侧 45~180°之间 (权重值 8); 中层风暴的悬挂至少为 4km 且方向在风暴运动方向的右侧 45~180°之间 (权重值 15); 最高可探测风暴位于中高悬挂之上 (权重值 18), 这 7 个指示性因子权重值的累加为 100。对于每一个风暴来说, 当一个指示性因子满足时, 其权重值就累加到该风暴的 W_{FO} (该风暴满足的所有指示性因子权重值的累加) 上, 当一个指示性因子无法探测时 (如所需仰角超过雷达探测范围), 其权重值就累加到该风暴的 W_{FR} (该风暴无法探测的所有指示性因子权重值的累加) 上。然后利用 W_{FO} 和 W_{FR} 计算冰雹置信度因子 C_{FA} 和冰雹成绩 S_{CR} :

$$C_{FA} = 100 - W_{FR}$$

$$S_{CR} = (W_{FO}/C_{FA}) \times 100$$

若 $C_{FA} \leq 25$, 说明无足够资料探测冰雹; 若 $C_{FA} > 25$ 且 $S_{CR} \leq 50$, 说明不可能产生冰雹; 若 $C_{FA} > 50$ 且 $50 < S_{CR} < 60$, 说明可能产生冰雹; 若 $C_{FA} > 50$ 且 $S_{CR} \geq 60$, 说明肯定产生冰雹。

1.2 算法的改进版本

由于早期的冰雹探测算法存在着很多局限性, 因此一直在进行对其改进的研究, 虽然形式上有较大差别, 但思路都是建立在探测冻结层以上的高反射率因子上。目前美国多普勒天气雷达使用的 HDA 采用的是 Arthur Witt 等人在 1998 年提出的增强的冰雹探测算法^[3]。

1.2.1 算法简介

新的 HDA 仍然是一个基于反射率因子的算法, 它是在垂直累积液态水含量 VIL 算法的基础上设计的, 同时与改进的风暴单体识别与跟踪算法 SCIT 相结合。算法通过 SCIT 识别并跟踪风暴中心, 将冰雹探测指标输入 HDA, 通过 SCIT 观测每一层的高度和最大反射率因子值, 根据获得的最大反射率得出特定风暴的三维描述并输入算法。

1.2.2 冰雹概率 P_{OH}

冰雹概率是 $(H_{45} - H_0)$ 的函数, 其中 H_{45} 是强度达 45dBz 的回波相对于雷达的高度; H_0 是溶化层相对于雷达的高度。

1.2.3 强冰雹概率 P_{OSH}

强冰雹是指直径约 $\geq 19\text{mm}$ 的冰雹。在雷达产品的应用中, 发现垂直液态水含量 VIL 能广泛的应用于强冰雹的预报^[4]。因此, 为了确定能产生冰雹的强风暴的存在, 采取了类似 VIL 算法的处理方法, 同时作了一些改变。首先将基于格点的算法变为基于单体的算法; 然后使用反射率因子与冰雹的关系代替了 VIL 中的反射率因子与液态水的关系, 将反射率因子数据转换成冰雹动

能的通量值 E 。由图 1 可见, VIL 算法使用了一个“上限反射率因子”, 相当于多普勒雷达降水处理系统 PPS 中的“最大封顶降水率”这一概念, 目的就是要过滤掉与冰雹有关的高反射率因子。而在 HDA 算法中, Z-E 关系函数:

$$E = 5 \times 10^{-6} \times 100.084^z W(z)$$

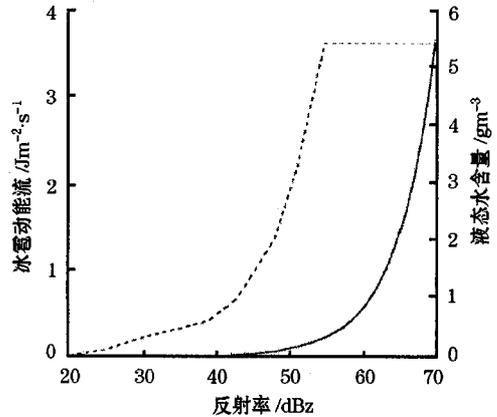


图 1 冰雹动能通量 (实线) 及液态含水量 (计算 VIL, 虚线) 与反射率因子关系

仅使用与冰雹有关的典型高反射率因子, 从而滤掉了与液态水有关的大部分较低的反射率因子, 使冰雹动能通量 E 与地面冰雹的灾害性潜势密切相关^[4]。HDA 算法的另一个改进是使用了温度权重的垂直积分, 并定义了一个强冰雹指数 I_{SH} (Severe Hail Index):

$$I_{SH} = 0.1 \int_{H_0}^{H_T} W_T E dH$$

其中: $W_T(H)$ 是 H_0 (0°C 层高度)、 H_{m20} (-20°C 层高度)、 H_T (风暴单体顶的高度) 的函数。

1.2.4 最大预期冰雹尺寸 S_{MEH}

强冰雹指数 I_{SH} 也被用来做最大冰雹尺寸的预测, 这是一个完全的经验估计式, 单位是 mm:

$$S_{MEH} = 2.54 \times (I_{SH})^{0.5}$$

2 对算法的分析讨论

2.1 简析算法

在对风暴分析中，新算法设计的强冰雹指数 I_{SH} 包含了温度和反射率两个因子，同时假设了 40dBz（可调）以下的反射率是由雨滴造成的、50dBz（可调）以上的反射率是由冰雹造成的，而 40dBz 到 50dBz 之间的反射率是由冰水混合物造成的，并在函数 $W_T(H)$ 中假设温度在 0°C 以上的反射率完全是由雨滴造成的、温度在 -20°C 以下的反射率完全由冰雹造成的，而温度在 -20°C 到 0°C 之间的反射率是由冰水混合物造成的。因此，我们可以在不同季节，根据本地区的气候特征，通过调整两个反射率阈值来降低冰雹的伪警率。

HDA 主要是通过识别风暴体内高反射率因子来判断冰雹的，这和预报局地强降水的思路相似，特别是上海地区在盛夏季节， 0°C 层高度太高，此时，即使云顶很高，也较难产生降雹，此时的冰雹指数往往指示了灾害性强降水天气。在春秋季节，当 -20°C 层较低时，过冷水滴累积区上界较容易达到此高度，此时的冰雹指数指示的多为冰雹天气。

原来的 HDA 算法只是简单判断探测的风暴单体是否会产生冰雹，改进后的算法可以估计冰雹概率、强冰雹概率并预测每个风暴单体可能产生的最大冰雹尺寸。算法还发展了一个新的参数，称为强冰雹指数 (I_{SH})，在使用冰雹指数的过程中发现，HDA 在预测强冰雹方面效果较好。

2.2 算法存在的问题

在预报应用中发现，冰雹探测算法对风暴中冰雹的存在有一定的预警能力，特别是

当冰雹尺寸较大 ($D > 2.5\text{cm}$) 时探测效果显著。但 HDA 只考虑了冰雹在冻结层以上的形成过程，而没有很好考虑冰雹形成后下降到冻结层之下的融化过程，这会使降雹概率和冰雹尺寸预报偏大。在温暖潮湿的环境中或对尺寸较小的冰雹来说，这种误差会更大。特别是在盛夏季节，地面温度高，冰雹在下降过程中的融化更为明显。这也造成了在实际应用中，冰雹指数显示 P_{OH} 或者 P_{OSH} 较大时，高空的冰雹在降落过程中融化或部分融化而仅仅产生了局地强降水，HDA 往往会过高估计冰雹天气的可能性，但却能帮助我们预报局地暴雨。

冰雹探测算法首先需要利用 SCIT 追踪风暴，输入风暴的三维结构，再对其进行具体分析。一旦 SCIT 出现错误，没有追踪到风暴，或者追踪存在误差就会造成 HDA 的错误。

算法假定各个仰角上的风暴分量为一个圆，可能会使冰雹悬挂指示性因子项的计算产生较大误差而降低冰雹探测性能。风暴顶的辐散等是产生冰雹很重要的特征，但这些显著的多普勒雷达速度场信息在冰雹探测算法中并未被使用。

2.3 算法的参数设置

冰雹探测算法 HDA 需要用户准确、及时的输入 0°C 和 -20°C 环境温度层的高度、风暴的移向移速，因为 0°C 层高度 (H_0) 和 -20°C 层高度 (H_{-20}) 与成雹关系密切，不正确的输入或者不能及时更新这些参数会降低算法的性能。特别是当环境场快速改变却没能及时订正 0°C 和 -20°C 层的高度时，利用冰雹指数进行预报的准确率也会降低，这一点是预报员在实际应用中需要特别注意的。

2.3.1 冰雹环境温度和缺省的风暴运动

算法在环境数据中提供冰雹温度和缺省

的风暴运动设置功能。在新版的 ORPG 中, 为了正确的识别冰雹, 值班员可以很方便的从有代表性的探空中提供 0° 和 -20° 处的高度值给 RPG 的冰雹算子, 该算子搜索在冻结层以上的反射率因子高值。我们的经验是根据不同季节的统计值更换当令季节的平均 0° 和 -20° 层高度值, 作为缺省的冰雹探测环境数据, 当探空有较大变化时再调整为实际的数据。缺省的风暴运动是作为风暴单体跟踪时外推的初始值, 我们从上海对流风暴单体出现最多的移向移速 (260° 和 40KTS) 情况进行缺省设置, 如有较大的变化, 值班员也可以随时调整。

2.3.2 风暴单体跟踪个数和冰雹探测结果的显示

可调参数编辑功能还提供用户在显示冰雹指数产品时定义有关的参数, 包括跟踪风暴单体个数, 过去、当前和预报的位置, 根据屏幕显示情况和经验, 共定义 10 个跟踪的单体, 依次由风暴单体的 VIL 值进行排队。单体太多, 则显示屏太杂乱, 而太少则可能会漏掉有意义的强单体。冰雹探测算子所提供的冰雹概率, 根据预先设定的概率阈值以 4 种不同形式对产品进行显示, 对应不同尺寸的冰雹在可能出现冰雹的位置上显示不同大小的空心或实心绿色三角形, 有强冰雹时, 会在三角形中间标上估计的冰雹尺寸值。

3 HI 和 VIL 的统计特征及分析

统计 2000—2004 年 5 年间的实况资料, 选取了有配套多普勒天气雷达资料的局地强降水 (有冰雹或实测雨量 $\geq 20\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 过程共 22 次。

3.1 HI 的统计特征

在 22 次强降水过程中, 算法都识别出了冰雹指数产品, 但真正出现冰雹天气的仅

7 次, 虽然冰雹指数的击中率 (P_{OH}) 达到了 100%, 但预报冰雹的伪警率却相当高。从 HI 的统计结果来看 (见图 2a, 其中 6、7、8、10、12、18、19 过程是冰雹天气), 在上海地区, 当 $P_{OSH} \geq 70\%$ 、 $S_{MEH} \geq 3.8\text{cm}$ 时, 出现冰雹的可能性较高, 但在春季, 冰雹指数很低时也会出现冰雹天气, 如第 6 过程是 4 月 2 日 ($P_{OH}=50$)、第 7 过程是 4 月 5 日 ($P_{OH}=20$), 季节特征非常明显。在夏季, 当 $P_{OH} \geq 80\%$ 时, 就要考虑局地灾害性强降水的产生了, 可见冰雹指数与局地强降水的相关性很大。统计结果还表明, HI 除了季节不同会有所差异外, 还与环境温度关系密切, 我们注意到 6、7 两次过程设置的 0°C 和 -20°C 环境温度层高度没有及时更新, 使用的是夏季的平均值, 导致了 HI 偏小, 这是因为冰雹生成条件是随季节、地域和天气背景而变化的, 因此环境参数是一个时刻变化的参数, 应用合理的环境参数就是考虑了当地的地理条件和大尺度环流背景, 由此可见环境参数的设置是十分重要的。

3.2 VIL 的统计特征

传统的观点认为 $VIL \geq 40\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时一般会产生冰雹天气^[1], 但从 VIL 的统计结果来看 (见图 2b), 在上海地区的春季符合此规律, 如 2002 年 4 月 2 日冰雹指数最大值 $P_{OSH}=0$, $P_{OH}=50$, $VIL=40\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 降雹; 2002 年 4 月 5 日冰雹指数最大值 $P_{OSH}=0$, $P_{OH}=20$, $S_{MEH}=0.5\text{inch}$, $VIL=40\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 在南汇降雹。根据成雹的物理机制讨论, 适宜降雹的 0°C 层高度 (H_0) 一般在 4 公里上下, 这种条件在初夏或初秋最易满足, 所以此时降雹最多。这两次降雹都是在春季, 环境 0°C 温度层高度较低。但是在夏季未降雹的 15 次中, 有 12 次 $VIL \geq 45\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 根据统计资料认为, 在夏季,

只有当 VIL 足够大 ($VIL \geq 55 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时), 才会出现冰雹天气。因此春夏两季可设置不同的 VIL 阈值。

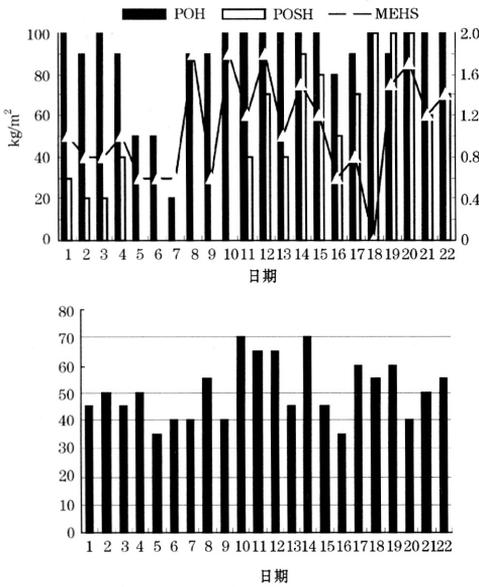


图 2 2000—2004 年 HI (a)和 VIL (b)的统计图

3.3 HI 和 VIL

在这 22 次强降水过程中, HI 与 VIL 的最大值基本同时出现, 占总数的 90% (见图 3), 其中相差较大的两次 (分别为 3 和 5 个时次), 主要是保存下来的冰雹指数资料不全。还发现 HI 与 VIL 的最大值都是在最强降水出现之前达到。可见, VIL 和 HI 与局地强降水是密切相关的。

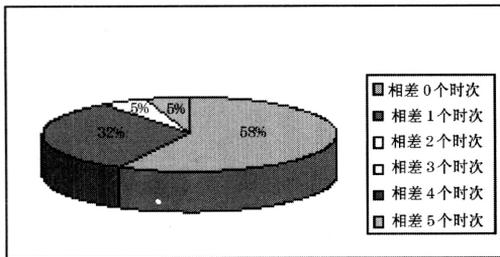


图 3 HI 与 VIL 最大值出现相差时次的分布图

另外, 分析 2004 年 7 月 8 日个例, VIL 最大值 $55 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 比 2003 年 7 月 17 日的最大值 $65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 小, 但 2004 年 7 月 8 日有降雹而 2003 年 7 月 17 日却没有。比较这两次的冰雹指数发现: 2004 年 7 月 8 日虽然 VIL 值低一些, 但是冰雹指数值非常高, 最高时 $P_{OH} = 100$ 、 $P_{OSH} = 100$ 、 $S_{MEH} = 5.7 \text{ cm}$ 。但仅仅凭冰雹指数预报也会有问题, 如 2004 年 7 月 12 日冰雹指数最高时高达 $P_{OH} = 100$ 、 $P_{OSH} = 100$ 、 $S_{MEH} = 4.4 \text{ cm}$, 但是没降雹, 但这次过程的 VIL 最大值只有 $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。研究结果表明, 结合 HI 和 VIL 产品预报冰雹和局地暴雨可以提高预报准确率。根据统计特征, 在上海地区, 当 $VIL \geq 55 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $P_{OSH} \geq 70\%$ 、 $S_{MEH} \geq 3.8 \text{ cm}$ 时, 出现冰雹的可能性较高, 而当 $VIL \geq 35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $P_{OH} \geq 80\%$ 就要考虑灾害性强降水的预报了。

3.4 个例分析

盛夏季节的 7 月 25 日中午, 在黄浦江以东的上海浦东和南汇地区出现大片的强回波区, 13:25—13:40 在浦东下了小鸡蛋大小的冰雹, 13:35 在南汇下了直径 14~15mm 的冰雹, 整个过程都伴随着局地暴雨。分析研究上海多普勒天气雷达的 HI 、 VIL 、 CR (组合反射率) 和 R (反射率) 产品, 发现代码为 A0 和 C0 的两个风暴单体持续时间较长, 对此次强天气过程有重要影响。

图 4 (见彩页) 是这次冰雹天气在 13:10 的组合发射率因子 CR 图叠加 HI 和液态水含量 VIL 图, 此前的两个强回波中心完全合并为一个超级单体回波, 50dBz 以上的红色面积增大, 最大回波强度维持在 60dBz。冰雹指数 $P_{OH} = 100$ 、 $P_{OSH} = 50$ 、 $S_{MEH} = 3.2 \text{ cm}$ 。 VIL : $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。均满足出现冰雹的统计特征。

图 5 是这次冰雹天气的 HI 和 VIL 随时间强度变化曲线。13:10, $P_{OH} = 100$ 、 $P_{OSH} = 60$ 、 $S_{MEH} = 3.8\text{cm}$ 、 $VIL = 65\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。而 VIL 是在 12:53—12:59 超过 $55\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ，到 13:16 达到最大值， HI 和

VIL 出现后都持续增长，在 13:16 左右达到最大值，13:25 开始下冰雹，最大值维持一段时间后下降， HI 在 13:28 开始下降， VIL 13:39—13:45 之间开始减小，降雹结束后仍有强降水持续。

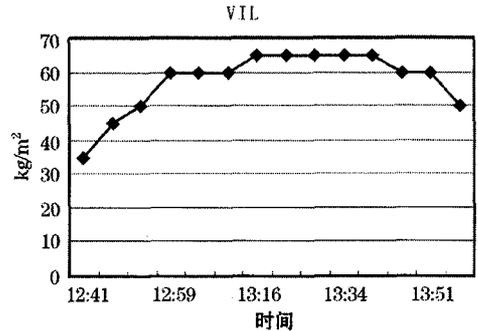
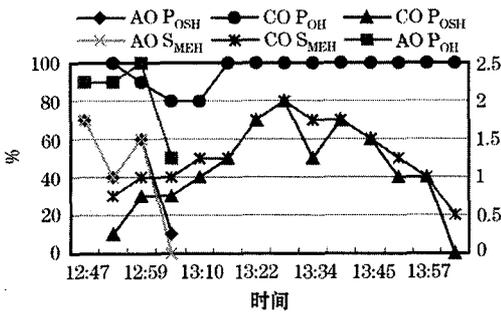


图 5 2004 年 7 月 25 日 HI (a) 和 VIL (b) 随时间的变化

4 结 语

(1) 新一代天气雷达产品—冰雹指数预报冰雹的伪警率较高，可以根据本地区的地理位置，季节变化以及天气背景条件，通过算法的要素统计，设定阈值并调整算法的参数以改善其预报准确率。

(2) 冰雹指数预报冰雹的思路与局地强降水天气的出现有密切关系，特别是盛夏季节可望利用它来改善局地灾害性强降水的预报。

(3) 冰雹探测算法需要用户准确、及时的输入 0°C 和 -20°C 层的高度、风暴的移向移速，可以利用当时季节的统计值修改参数，在不增加预报员工作量的前提下提高算法的性能。

(4) 在利用冰雹指数预报冰雹和局地强降水时，综合使用多种雷达产品对提高预报的准确性和时效具有很大的帮助。

参考文献

- [1] OTB, OSF. WSR-88D OPERATIONS COURSE, 1997. 5: TOPIC 8, 102-108.
- [2] 邵玲玲, 邬锐, 黄宁立. 上海地区夏季的灾害性强降水, 大气科学研究与应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2005, (2): 25-29.
- [3] Arthur Witt, Michael D. Eilts, Gregory J. Stumpf, and Co-authors, An Enhanced Hail Detection Algorithm for the WSR-88D. Weather and Forecasting [J], 1998, 13(2): 286-303.
- [4] Eric Lenning and Henry E. Fuelberg. An Evaluation of WSR-88D Severe Hail Algorithms along the Northeastern Gulf Coast. Weather and Forecasting [J], December 1998, 13: 1029-1045.

邵玲玲等：冰雹指数产品剖析及在灾害性强降水预报中的应用

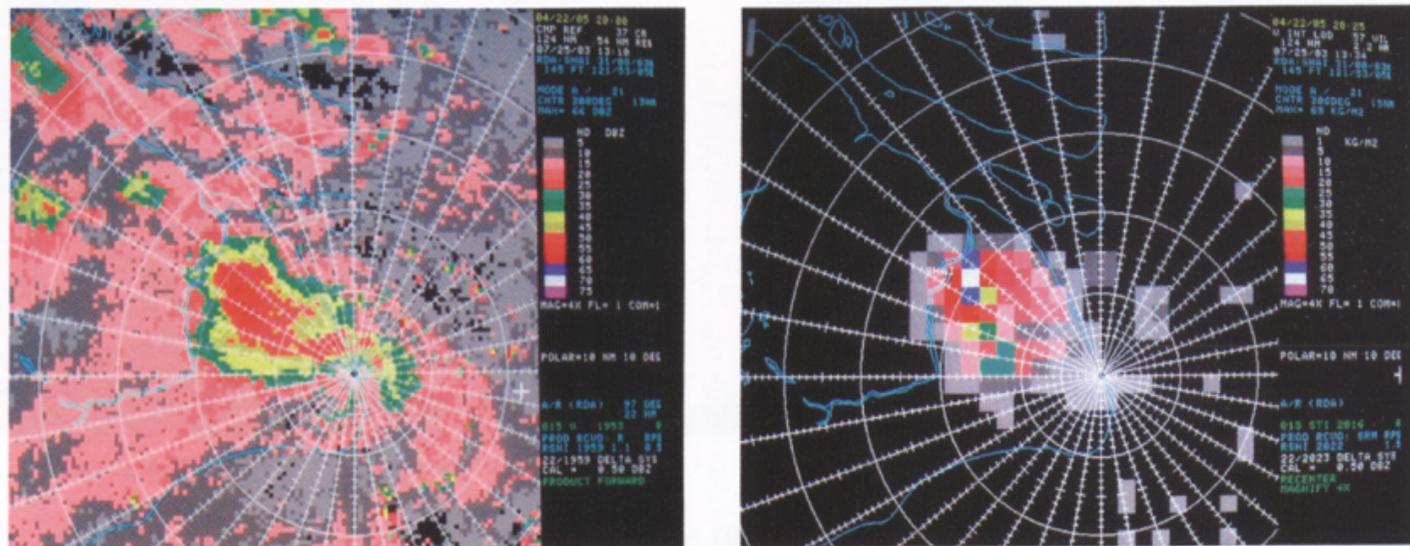


图4 2003年7月25日13时10分CR、HI图(左)和VIL图(右)