

陈羿辰, 何晖. 2017. 基于偏振雷达的积层混合云降水增雨潜力识别方法研究 [J]. 大气科学, 41 (3): 578–592. Chen Yichen, He Hui. 2017. A study to determine enhancement potential for convective–stratiform mixed precipitation based on polarimetric radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (3): 578–592, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1611.16171.

# 基于偏振雷达的积层混合云降水增雨潜力 识别方法研究

陈羿辰<sup>1,2</sup> 何晖<sup>1,2</sup>

1 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089

2 北京市气象局云降水物理研究和云水资源开发北京市重点实验室, 北京 100089

**摘 要** 本文统计分析北京地区近三年的有效降水, 重点研究了积层混合云降水特点并对其分类, 发现积层混合云降水出现频次约占总降水次数的 61%, 其中积层混合云降水以积层连结型和水平混合型为主, 二者之和占近 80%。重点分析了积层混合云中对流和层云两种不同特点降水类型的宏微观结构, 确立了反射率因子  $Z$ 、温度  $T$ 、粒子含水量  $M$ 、催化剂 AgI (碘化银) 活化率 NE 和粒子相态 HTC (hydrometeor type classification) 为人工增雨潜力识别指标及这些识别指标的取值范围, 同时也根据研究现状和人工影响天气需求总结制定出人工增雨潜力等级。利用偏振雷达构建模糊逻辑识别算法对积层混合云三种降水类型进行增雨潜力区域识别研究, 结果表明: (1) 对于播撒碘化银增雨来说, 积层混合云的增雨潜力区在垂直方向上可分为上、中、下三层, 上层 (增雨等级为“不适合”) 和下层 (零度层及以下) 分别受含水量和温度等影响不适合增雨, 中间层 (增雨等级大于等于“等级一”) 是可增雨区域; (2) 积层混合云中层云区增雨潜力较小, 对流云区可增雨潜力要远大于层云区, 开式流场型与积层连结型可增雨潜力要大于水平混合型; (3) 当降水云中识别出霰粒子时, 其附近的大部分区域会有较好的增雨潜力。通过偏振雷达实例检验和数值模式模拟在积层混合云不同部位播撒碘化银催化试验发现, 在增雨潜力较好的区域催化有很明显增雨效果, 模拟试验结论与偏振雷达识别增雨潜力区结果也基本一致, 说明基于偏振雷达的增雨潜力区识别方法和结果是具有参考意义的。

**关键词** 偏振雷达 增雨潜力 积层混合云 粒子含水量

文章编号 1006-9895(2017)03-0578-14

中图分类号 P401

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1611.16171

## A Study to Determine Enhancement Potential for Convective–Stratiform Mixed Precipitation Based on Polarimetric Radar

CHEN Yichen<sup>1,2</sup> and HE Hui<sup>1,2</sup>

1 Beijing Municipal Weather Modification Office, Beijing 100089

2 Beijing Key Laboratory of Cloud, Precipitation and Atmospheric Water Resources (LCPW), Beijing meteorological service, Beijing 100089

**Abstract** Statistical analysis on effective precipitation enhancement in Beijing area over the past three years was conducted. Characteristics and classification of convective–stratiform mixed clouds were also studied in this paper. Results show that the frequency of mixed clouds precipitation accounted for 61% of the total frequency. Convective–

收稿日期 2016-05-04; 网络预出版日期 2016-11-24

作者简介 陈羿辰, 男, 1983 年出生, 硕士、工程师, 主要从事人工影响天气与气象雷达应用研究。E-mail: chenychen@bjmb.gov.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2016YFA0602001, 国家自然科学基金项目 41675138、41375136, 北京市自然科学基金资助项目 8174068、8154048

**Funded by** National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0602001), National Natural Science Foundation of China (Grants 41675138 and 41375136), Beijing Natural Science Foundation (Grants 8174068 and 8154048)

stratiform connected type and horizontally mixed type are the main types of mixed clouds precipitation and the two types of precipitation account for 80% of the total. This study mainly analyzed the macro- and micro-physical structures of convective clouds and stratus clouds in convective–stratiform mixed clouds. Identification indexes, including the reflectivity factor  $Z$ , temperature  $T$ , particle water content  $M$ , AgI nucleation efficiency (NE), hydrometeor type classification (HTC), and their ranges were determined. Levels of rain enhancement potential were established based on the research situation and weather modification demands. Fuzzy models and algorithms based on polarimetric radar data were established to identify regions of rain enhancement potential for convective–stratiform precipitation. The results show that three layers in the vertical (upper, middle, and lower) could be found in the rain enhancement potential area. Both the upper and lower layers are not suitable for artificial rain enhancement because of the influence of water content and temperature. Thereby only the middle layer is fit for artificial rain enhancement. It was also found that the stratus clouds in the mixed clouds have a small rain enhancement potential, whereas the convection clouds have a large potential. Of different types, the open airflow type and convective–stratiform connected type have a higher potential for artificial rain enhancement than the horizontally mixed type. Furthermore, when graupels are detected by radar, the nearby areas will have a large potential for artificial rain enhancement. Cloud seeding with AgI in different layers was simulated using a numerical model. The result of the numerical model is basically consistent with the result of radar detection. This indicates that the identification method based on polarimetric radar has great implication for assessing artificial rain enhancement potential.

**Keywords** Polarimetric radar, Rain enhancement potential, Convective–stratiform mixed clouds, Particle water content

## 1 引言

积层混合云是一种重要的降水类型，在梅雨锋、冷锋、地形云降水等多种天气过程中都会出现，积层混合云也是华北地区 4~9 月增雨作业最多的降水类型。利用火箭和飞机增雨催化作业各有优势和缺点，火箭不受复杂气象条件限制，但可催化和影响的范围小，飞机虽然可以在任何指定位置作业但易受气象条件制约，二者成本都很高。因此增雨潜力区域准确识别有利于提高增雨催化效果，避免资源浪费和催化作业盲目性。

在判断云系增雨潜力时，有学者把水汽含量、冰晶浓度和降水效率作为增雨潜力的指标，也有学者用云水厚度、过冷水含量和冰面饱和区来确定潜力区，人工增雨潜力是一个复杂的科学问题，与云系的结构有关，也与降水形成的物理过程有关，用任何单一因子判断都有一定的片面性和局限性（黄美元和洪延超，1984；黄美元等，1987a, 1987b；洪延超和周非非，2006）。

Chappell and Johnson（1974）从降水云的含水量、温度、水汽条件和动力条件来分析地形云的人工增雨潜力。Vardiman and Moore（1978）提出含水量和云顶温度可作为增雨作业指标。胡志晋（2001）提出的增雨潜力识别指标包括云降水宏观特征和云物理特征，如持续发展的雨区、云顶和云底高度、温度、过冷层厚度、云中升速、过冷云水和冰晶浓度等。雷恒池等（2001）发现在降雨前的

云系中普遍存在水汽和液态水含量跃增的现象，提出在降水云系周围存在丰水区的假设，认为丰水区可能是云滴向雨滴转化的孕育区和人工增雨最佳作业区。王以琳等（2002）指出可播区位于冰水转化区中 $-5\sim-15^{\circ}\text{C}$ 范围内，增雨潜力与冰水转化区和可播区的厚度有关。然而这些人工增雨条件大部分都是通过对大气降水云的人工增雨机制的考虑、数值模拟结果和经验提出的，有些增雨潜力指标缺乏对云的实际探测检验和改进，在实际人工增雨作业中很难使用。汪学林等（2001）分别使用云物理方法和雷达探测资料方法分析增雨潜力，得出人工增雨潜力识别指标是中云云厚至少大于 1700 m，低云云底高度至少低于 1500 m，云顶温度范围 $-5\sim-20^{\circ}\text{C}$ 。吴志会等（2005）通过统计分析 1981~2000 年 20 年中 15 种降水天气系统影响下河北地区自然降水特征，并对火箭人工增雨潜力进行了初步分析，结果表明夏季降水系统最强，云水资源丰富，人工增雨潜力很大，是开展火箭人工增雨催化作业的最佳季节，春、秋两季增雨潜力明显比夏季小，冬季最小。肖卉等（2008）收集 1998~2005 历年作业数据，利用雷达就不同季节目标云的选择、作业时机、火箭发射角、催化剂量等多项作业指标进行研究，总结出人工增雨作业技术方法。唐仁茂等（2012）通过分析对流云降水增雨个例提出了回波强度、回波顶高、液态含水量、强回波面积等人工增雨的催化指标。显而易见，这些增雨潜力的指标几乎都是根据常规多普勒天气雷达探测结果提出

来的,在绝大部分省(直辖市、自治区)人工增雨作业中广泛使用,但是常规的多普勒天气雷达不具备对云微物理过程的探测能力,更多的是对云宏观特征描述,对已有的数值模式成果难以综合使用,很难把理论成果与实际探测结果相结合,得出实时和更加科学的增雨潜力指标。

综上所述,有关增雨潜力指标的数值模拟和观测资料分析工作已经取得了一些非常有意义的成果,但利用常规多普勒雷达观测的分析由于探测水平有限很难有微物理过程加入,只能从宏观特征上进行总结分析。因此本文利用双偏振雷达的粒子相态识别功能,改进粒子含水量估测方法,在已有的基础上加入云系发展的微物理变化过程,再综合考虑催化剂核化效率等因素,分类研究积层混合云降水的增雨潜力区域识别方法,最后用数值模式模拟结果和偏振雷达探测实例进行可信度分析,这就将模式研究成果较好地融合到基于偏振雷达的增雨潜力识别中。

## 2 观测设备和数据处理方法

### 2.1 观测设备介绍

本文所使用的观测设备是北京市人工影响天气办公室的车载 X 波段双通道双线偏振全相参多普勒天气雷达(下文简称为偏振雷达)。该雷达架设于河北省张家口市怀来县东花园镇,每年 3~10 月进行观测。偏振雷达主要技术参数见表 1。

表 1 X 波段偏振雷达主要性能指标

Table 1 Main specifications of X band polarimetric radar

| 序号 | 指标项  | 详细说明  |
|----|------|---|
| 1  | 雷达体制 | 双线偏振、全相参、单发双收/双发双收/脉间变极化  |
| 2  | 工作频率 | 9370±30 MHz (X 波段)  |
| 3  | 探测范围 | 水平探测距离: 75 km、100 km、150 km、300 km, 方位扫描范围: 0°~360°, 俯仰扫描范围: -2°~+90°   |
| 4  | 探测要素 | 水平反射率、径向速度、速度谱宽、差分反射率、差分传播相移、零相关系数  |
| 5  | 探测精度 | 强度: ≤1 dBZ, 速度: ≤1 m s <sup>-1</sup> , 谱宽: ≤1 m s <sup>-1</sup> , 差分反射率: ≤0.2 dB, 线性退偏振比: ≤0.2 dB, 单位差分传播相移: ≤1°/km |
| 6  | 探测模式 | VOL (立体扫描)、PPI (平面位置扫描)、RHI (垂直高度扫描) 及 SPPI (扇形扫描), 天线转速: 0.5~4 rpm   |

### 2.2 数据处理方法

文中主要使用偏振雷达数据,其水平反射率、差分反射率数据已经过衰减订正(毕永恒等, 2012)、单位差分传播相移重新提取和杂波抑制等数据质量控制(陈羿辰等, 2012),其各偏振雷达数

据质量已能满足本文对参数精度的要求。本文主要利用偏振雷达的粒子相态识别和粒子液含水量分类估测能力对积层混合云进行增雨潜力分类研究。其大致分析方法如下:(1)严格进行雷达数据质量控制,对积层混合云进行粒子相态识别;(2)在粒子相态识别的基础上分类估算各种粒子含水量;(3)通过分类研究积层混合云中对流和层云的特点以及粒子和含水量垂直分布等特征来确定增雨潜力等级分类的影响参数以及各参数的范围;(4)设计模糊逻辑识别系统,按照积层混合云降水类型进行增雨潜力等级分类识别,最后进行合理性讨论。

## 3 积层混合云分类

为了更有针对性的分析和讨论积层混合云降水在人工影响天气中的作用和人工增雨潜力等级分类要求。本文采用林磊和姚展予(2011)提出的积层混合云分类方法对北京地区近三年降水进行分类。(1)开式流场型:先出现层状云,当层云结构不稳定时,层云内部积化激发出对流泡,对流泡形成之后会爆发式增长,形成流场成开放形态的积层混合云。(2)积层连结型:先出现积云对流,然后经过跨接、并合、扩展层化而具有层云特征,在低层水平混合的同时,垂直方向上的对流得到一定的发展,从而形成低层水平混合、垂直方向上积下层形态的积层混合云。(3)水平混合型:层云积化时产生的对流泡未爆发式增长,或者多个对流单体经过跨接、并合、扩展层化时在水平方向混合发展,垂直方向增长不明显。经统计北京地区 2012~2014 年 3~10 月降水共 155 次,其中积层混合云降水为 95 次,约占总降水次数的 61%,对应有人工增雨作业的次数为 44 次,即约有一半的积层混合云降水都有增雨作业。北京地区积层混合云降水以积层连结和水平混合型为主(二者之和近 80%)具体统计数据见表 2。

## 4 增雨潜力识别指标

人工增雨潜力是非常复杂的科学问题,用任何单一指标判断云系增雨潜力,都具有片面性和局限性。洪延超和周非非(2006)从理论上分析不同要素与降水的关系时指出人工增雨潜力要素与云的垂直结构、降水机制、过冷水含量、冰晶浓度、水汽通量和冰面过饱和水汽量及降水效率等有关。因

此本文重点考虑降水云系的垂直结构特征、人工增雨催化剂碘化银的活化率、降水云中的云水含量和云厚、雪和霰的融化以及雪和霰碰并云水的微物理过程。

表 2 2012~2014 年 3~10 月北京地区降水类型统计

Table 2 Statistics of precipitation types in Beijing area from March to October in 2012-2014

| 年份   | 积层混合云类型 | 出现频次 | 占积层混合云降水比例 | 占 3~10 月总降水比例 |
|------|---------|------|------------|---------------|
| 2012 | 开式流场型   | 4    | 17%        | 59%           |
|      | 积层连结型   | 11   | 48%        |               |
|      | 水平混合型   | 8    | 35%        |               |
| 2013 | 开式流场型   | 2    | 7%         | 71%           |
|      | 积层连结型   | 16   | 53%        |               |
|      | 水平混合型   | 12   | 40%        |               |
| 2014 | 开式流场型   | 9    | 21%        | 57%           |
|      | 积层连结型   | 20   | 48%        |               |
|      | 水平混合型   | 13   | 31%        |               |

人工增雨潜力识别指标可以大致分为以下五种：(1) 反射率因子  $Z$ ；(2) 温度  $T$ ；(3) 粒子含水量  $M$ ；(4) AgI 活化率 NE (Nucleation Efficiency)；(5) 粒子相态 HTC (Hydrometeor Type Classification)。其中反射率因子  $Z$  是判断增雨潜力最基本的一个参量，它能描述降水云系整体情况。由雷达气象方程可知，雷达反射率因子与平均接收功率成正比，与粒子谱分布也有很大关系，云系的垂直宏观结构和云体厚度可以直接通过反射率强度所表现。温度  $T$  直接影响着云系内部粒子相态和催化剂 AgI 的成核效率，因此是判断云系增雨潜力一个非常重要的参数。文中温度  $T$  是以识别降水云中零度层为基准零度线，零度层以上温度是随着高度的上升每公里下降  $6.49^{\circ}\text{C}$  的方法来确定，经研究发现积层混合云降水几乎都有明显的零度层带，所以零度层高度可以准确识别（如果识别困难时可参考当日探空资料），然后通过线性插值计算出每层高度的温度值。AgI 的成核效率和核化方式不但与温度  $T$  密切相关，还与云中粒子相态 HTC 也紧密相关，云中粒子相态直接影响着 AgI 的核化方式和增长机制，例如云（雨）滴与 AgI 粒子的接触冻结核化和水汽在人工冰核上的凝华核化，当 AgI 核化后，主要是形成大量人工冰晶，一部分冰晶通过凝华结冻增长、转化为霰，一部分被已经存在的霰吸收继续增长，在增长到一定程度后将会下落到暖区，融化成雨水。下面具体分析其中几个重要人工增雨潜力指标。

#### 4.1 AgI 活化率

为获取催化剂 AgI 活化率，黄燕和徐华英（1994）进行如下假设：AgI 粒子是单分散谱，半径为  $0.1\ \mu\text{m}$ ，忽略下落末速度，平均质量  $m_s = 2.38 \times 10^{-14}\ \text{g}$ ，一个液滴只能捕获一个活化冰核发生接触核化，忽略冰质粒与 AgI 粒子的碰并及 AgI 粒子的光解反活化。当温度小于  $-20^{\circ}\text{C}$  时，所有的 AgI 粒子全部会活化，基于以上假设，人工冰核活化率可表示为

$$N_E(\nabla T) = \begin{cases} 0, & \nabla T < 5^{\circ}\text{C}, \\ 10^3 \exp(-0.022\nabla T^2 + 0.88\nabla T - 3.8), & 5^{\circ}\text{C} \leq \nabla T < 20^{\circ}\text{C}, \\ 1.6 \times 10^5, & \nabla T \geq 20^{\circ}\text{C}, \end{cases} \quad (1)$$

其中， $N_E(\nabla T)$  的单位是个  $/\text{m}^3$ ， $\nabla T = T_0 - T$ ， $T_0 = 273.15\ \text{K}$ 。AgI 每立方米的活化个数随温度的曲线如图 1 所示，当温度大于  $-5^{\circ}\text{C}$  时催化剂不能成核，当温度在  $-10^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$  时，碘化银开始随着温度降低而活化，但是成核效率并不高，增长趋势很缓慢，到  $-10^{\circ}\text{C}$  时约为  $1.7 \times 10^4$  个  $/\text{m}^3$ ，当温度在  $-20^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$  时，碘化银活化率随着温度减小呈指数趋势上升，当温度低于  $-20^{\circ}\text{C}$  时，碘化银的活化效率基本保持不变，维持在  $1.6 \times 10^5$  个  $/\text{m}^3$  左右。

#### 4.2 粒子相态产品 HTC

本文粒子相态产品 HTC 是采用偏振雷达粒子相态识别结果，作者及所在单位北京人市工影响天气办公室在偏振雷达粒子相态识别方面已开展了大量工作，目前所研发系统已能自动识别出雨滴、

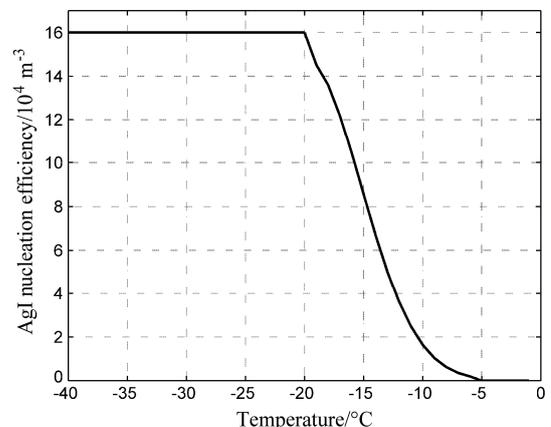


图 1 AgI 活化率随温度  $T$  变化的曲线

Fig. 1 Variation of AgI nucleation efficiency with temperature ( $T$ )

冰雹、雪、霰等 12 种相态粒子。根据北京市气象局和北京市人市工影响天气办公室 2009~2015 年相态识别系统使用报告可知,该系统能非常准确的识别出雨滴、冰雹、雪、霰等粒子。表 3 给出了偏振雷达冰雹识别和地面降雹实况验证结果,以及未识别出的原因。由表 3 对比结果可知,偏振雷达对冰雹的识别已经达到了非常高的识别率,只要冰雹出现在偏振雷达的有效观测区域,就能准确的识别出。零度层及以上冰相粒子相态识别结果也通过飞机观测(机载二维粒子图像探头)对比验证(陈羿辰等, 2016),发现与实际观测基本一致,因此相态识别结果是可信的。

表 3 2009~2015 年偏振雷达冰雹识别与地面降雹对比统计结果

Table 3 Statistics of comparison results of polarimetric radar observations and surface hail records

| 年份   | 偏振雷达冰  |       | 未识别原因          |
|------|--------|-------|----------------|
|      | 地面降雹/次 | 雹识别/次 |                |
| 2009 | 7      | 4     | 两次不在观测范围内,一次断电 |
| 2010 | 7      | 5     | 一次波束阻挡,一次断电    |
| 2011 | 12     | 11    | 波束阻挡           |
| 2012 | 8      | 7     | 断电             |
| 2013 | 15     | 13    | 两次波束阻挡         |
| 2014 | 16     | 15    | 雷达停机维修         |
| 2015 | 18     | 14    | 平谷区波束阻挡四次      |

### 4.3 粒子含水量 $M$

粒子含水量  $M$  指单位体积内云和降水中液态或固态粒子的总质量。本文采用基于 Marshall and Palmer (1948) 提出了一种滴谱的指数分布形式,即可以分别描述反射率因子  $Z$  和粒子含水量  $M$ , Greene and Clark (1972) 通过化简并消除共同参数得到如下  $Z$ - $M$  关系式:

$$M = \frac{N_0 \rho \pi}{(720 \times 10^{18} N_0)^{4/7}} Z^{4/7}. \quad (2)$$

当  $\rho=1 \times 10^6 \text{ g m}^{-3}$ ,  $N_0=8 \times 10^6 \text{ m}^{-4}$  时,雨水含量可以表示为

$$M_w = 3.44 \times 10^{-3} Z^{4/7}, \quad (3)$$

其中,含水量的单位是  $\text{g m}^{-3}$ ,反射率因子  $Z$  的单位是  $\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$ 。由(2)式可知,粒子密度正比于含水量。为简化计算,假设了雷达在采样体积内是以某一种粒子为主,其他粒子可以忽略不计,其中  $\rho$  代入各粒子密度(Reisner et al., 1998),  $N_0$  为常系数,则霰、冰晶、雪、冰雹的含水量分别可以近似为

$$M_G = 1.38 \times 10^{-3} Z^{4/7}, \quad (4)$$

$$M_I = 1.72 \times 10^{-3} Z^{4/7}, \quad (5)$$

$$M_S = 0.34 \times 10^{-3} Z^{4/7}, \quad (6)$$

$$M_H = 3.10 \times 10^{-3} Z^{4/7}, \quad (7)$$

(4)~(7) 式中各参数单位与(3)式中一致。如果出现冰雹等粒子导致不满足瑞利条件时,式中  $Z$  应为等效反射率因子。虽然这样的近似仍然有误差,但是针对每种粒子有特定的含水量估测公式,为后面详细讨论提供可能性,其具体误差分析和算法改进会在另一文中详细说明。模糊逻辑本身具有对数据较强的容错能力,所以这样反演的粒子含水量精度可以满足增雨潜力识别的要求。

### 4.4 增雨潜力识别指标特征及取值范围

为了解积层混合云降水的特点以及如何确定增雨潜力识别指标的范围,本文将积层混合云降水分为对流云区和层云区来分析,重点讨论两种不同特点降水类型的降水宏观结构和粒子相态、各种粒子比例、含水量等垂直分布特征。图 2 为 2013 年 6 月 28 日 21:09 (北京时,下同)反射率因子(图 2a)与对应粒子相态识别结果(图 2b)和改进后的含水量估测结果(图 2c) RHI 扫描图,根据研究需求本文在层云区和对流云区各选定一个宽 10 km 的区域进行对比分析,层云区为距离雷达站 18~28 km 处,对流云区为距离雷达站 42~52 km 处,选定区域见图 2 中红色矩形框。

图 3 是图 2 中所选层云区和对流云区的平均反射率和不同类型粒子采样数的垂直分布特征,图 3a、b 横坐标表示反射率强度,图 3c、d 横坐标表示雷达采样距离库数,本文近似认为每个采样距离库内为一种粒子。由图 3a、b 所示层云区和对流云区的平均反射率垂直分布特征可以看出,在层云区反射率平均值有一个明显峰值,即为零度层带,高度在 3 km 左右,其值约为 37 dBZ。随着高度的上升平均值逐渐减小,在 3~4 km 高度区间平均反射率值出现明显的急剧下降趋势,减小值约 14 dBZ,这是由于零度层以上主要是以雪为主,反射率较小,越接近零度层,雪花开始融化,表面会形成水膜导致电磁波后向散射增强,所以在这个区间反射率会出现一个明显的跃变。图 3c、d 为不同类型粒子数量的垂直分布特征,可以看出零度层是一个清晰的分界线,零度层以下主要是液态降水区,大部分是雨滴,其中在对流云区夹杂着少量冰雹。在零度层以上的层云区

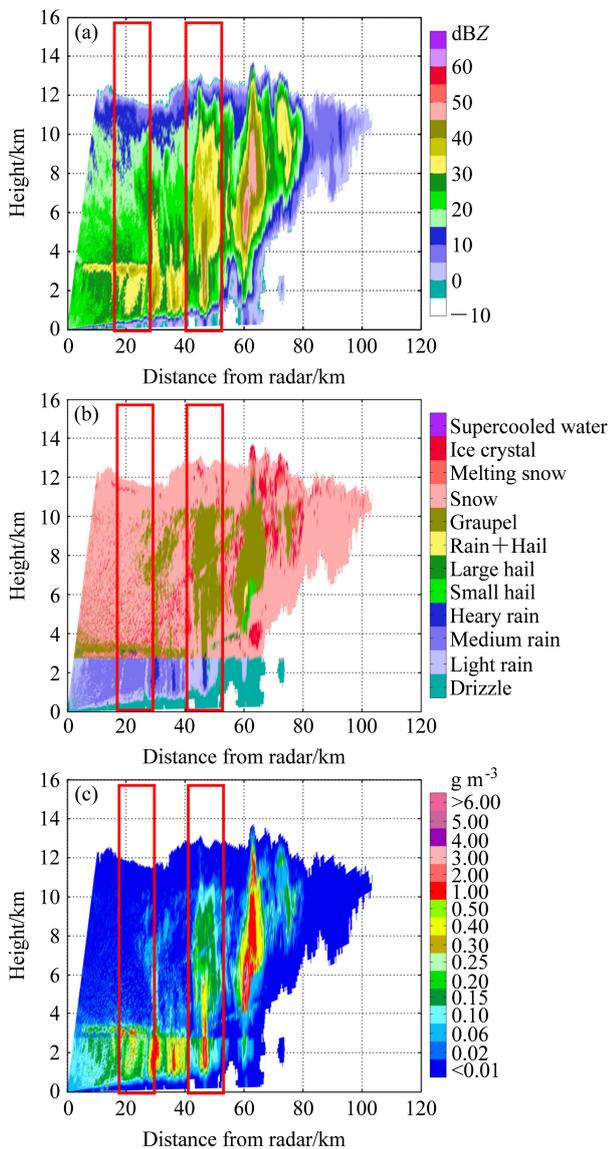


图2 2013年6月28日21:09的RHI(垂直高度扫描)扫描图:(a)反射率因子;(b)粒子相态识别结果;(c)改进后的含水量(单位: $\text{g m}^{-3}$ )估测。图中两个红色矩形框分别表示距离雷达站18~28 km(层云区)、42~52 km(对流云区)的区域

Fig. 2 Radar scan images of RHI (range height indicator) at 2109 BJT (Beijing time) 28 June 2013: (a) Reflectivity factor; (b) particles phase identification; (c) improved particle water content. The red rectangle areas represent 18–28 km (stratiform clouds) and 42–52 km (convective clouds) from radar, respectively

以雪为主,含有少量的冰晶和霰粒子,随着高度的上升所含比例变化不明显。而在零度层以上的对流云区,在5~10 km高度中,霰粒子占有较大比例,其次是雪和冰晶,也可以看出在3~4 km上也出现了冰雹,说明对流发展的比较旺盛,冰雹已经开始下落,但在下落的过程中出现融化,

未到地面时全部变成液态水滴。

图4a、b为图2中所选区域的粒子平均含水量的垂直分布,图4a为层云区、图4b为对流云区。由图4a可知,在3 km高度的零度层亮带区间,粒子含水量达到最大值,约为 $0.27 \text{ g m}^{-3}$ ,然后随着高度上升而迅速减小,保持在 $0.02 \text{ g m}^{-3}$ 左右。由图4b所示对流云区含水量可知,同样在零度层附近含水量值达到最大,随着高度上升而迅速减小,但减小的幅度没有层云区大,整体保持在一个含水量值较大的区间,约 $0.1 \text{ g m}^{-3}$ 左右。图4c、d分别为层云区和对流云区各种粒子含水量平均值的垂直分布,可以很清楚地看见,在零度层以下全是雨滴,所以含水量非常大。而在零度层以上,层云区和对流云区差别较大,层云区以霰粒子和冰晶粒子为主,在4~10 km高度层之间,含水量在 $0.02 \sim 0.08 \text{ g m}^{-3}$ ,在10 km以上区域主要以小雪花为主,含水量较低,几乎都小于 $0.02 \text{ g m}^{-3}$ 。在对流云区霰粒子占主导地位,在4~11 km高度层中,含水量在分布在 $0.05 \sim 0.23 \text{ g m}^{-3}$ ,其中冰晶和雪的含水量在 $0.01 \sim 0.07 \text{ g m}^{-3}$ 。在11 km高度以上主要是冰晶粒子和雪,含水量都在 $0.03 \text{ g m}^{-3}$ 以下。由于雷达回波在受到地物遮挡,以致在近地面回波偏弱,所以在分析反射率和粒子含水量垂直分布时,近地面有一个急剧增加的过程。

综上所述,本文将根据以下几个方面来确定增雨潜力等级对应参数范围:(1)根据积层混合云的结构特点,统计对流云区、层云区各种可能增雨等级可能的取值范围;(2)统计积层混合云中对流云区、层云区各种粒子比例、高度分布、含水量分布等确定范围;(3)根据温度和AgI活化关系进一步确定参数范围。再参考唐仁茂等(2012)提出人工增雨应选择组合反射率大于40 dBZ的回波区域,组合反射率小于30 dBZ的区域增雨效果不明显。基于以上分析本文确定增雨潜力等级识别指标范围详见表4。需要特别说明的是在对参数HTC模糊化时,需要对各种粒子相态数字化处理,比如粒子相态识别为雨滴,就包含了毛毛雨、小雨、中雨、大雨,因此可以将增雨潜力等级为“不适合”对应的HTC中的雨滴赋值为1~4,再进行模糊化处理。

## 5 增雨潜力识别方法

### 5.1 人工增雨潜力等级划分

降水云是人工增雨作业的主要对象,云系在一

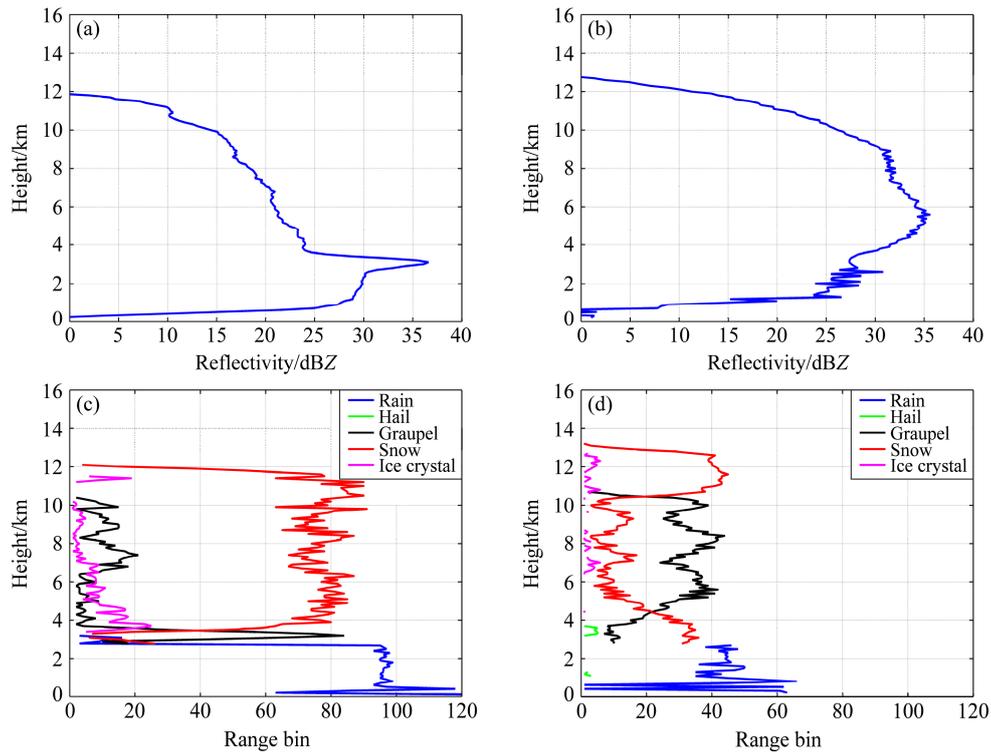


图3 图2中所选区域平均的反射率(上)和各种粒子采样距离库数(下)的垂直分布:(a)、(c)层云区;(b)、(d)对流云区  
Fig. 3 Vertical distributions of mean reflectivity (top panels) and range bins (bottom panels) in (a), (c) stratus cloud area and (b), (d) convection cloud area selected in Fig. 2

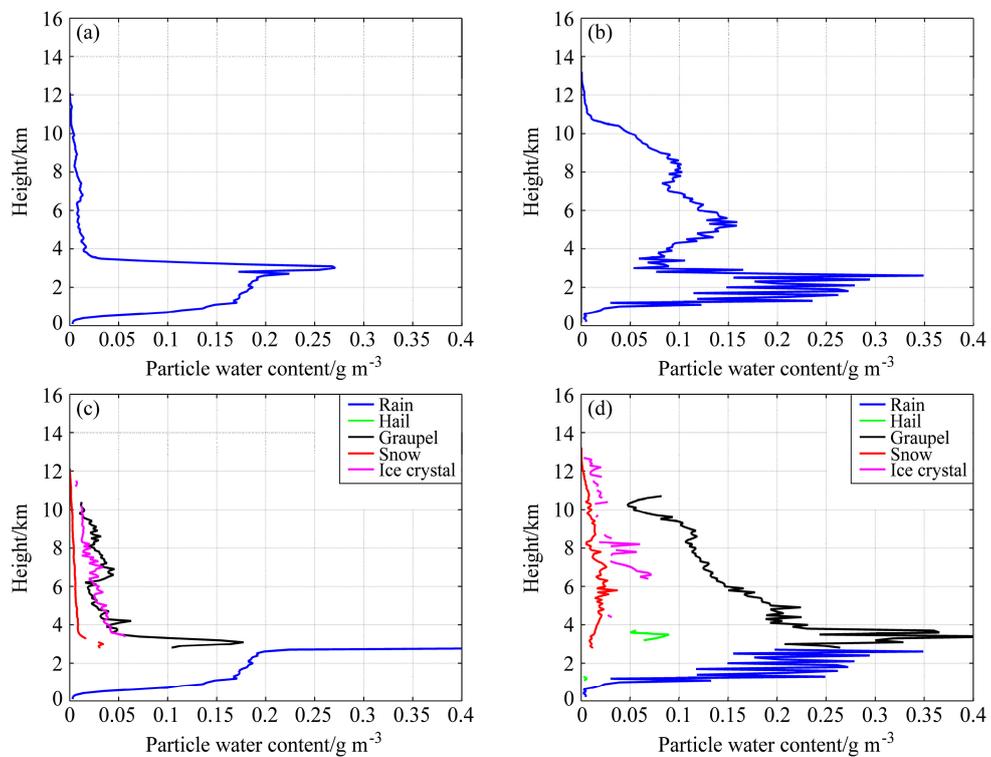


图4 图2中所选区域所有粒子含水量平均值(上)与各种粒子含水量平均值(下)的垂直分布:(a)、(c)层云区;(b)、(d)对流云区  
Fig. 4 Vertical distributions of mean particle water content of all particles (top panels) and particle water content (bottom panels) in (a), (c) stratus cloud area and (b), (d) convection cloud area selected in Fig. 2

表 4 增雨潜力等级对应参数的范围

Table 4 Parameter ranges corresponding to rain enhancement potential (REP) levels

| 增雨潜力 | 参数范围  |                     |        |                    |             |
|------|-------|---------------------|--------|--------------------|-------------|
|      | Z/dBZ | M/g m <sup>-3</sup> | T/°C   | NE/m <sup>-3</sup> | HTC         |
| 不适合  | -5~50 | 0.01~3              | -3~40  | 0~3                | 雨滴          |
| 一级   | 20~40 | 0.05~0.2            | -15~-2 | 1.6~8              | 霰、融化的雪、雪    |
| 二级   | 30~45 | 0.1~0.4             | -20~-5 | 4~12               | 霰、冰晶        |
| 三级   | 30~55 | 0.2~1               | -40~-8 | 8~16               | 霰、冰晶、过冷水、冰雹 |

注：Z 表示反射率，M 表示粒子含水量，T 表示温度，NE 表示 AgI 活化率，HTC 表示粒子相态识别。

定条件下通过催化作业可以增加降水，则称云系有增雨潜力。有很多研究增雨潜力的文献都提到了增雨潜力的大小，但没有量化，因为增雨潜力的大小受很多因素影响，很难进行量化处理。为了更进一步研究人工增雨潜力区识别工作，本文根据国内人影作业日常需求和业务中的实际情况，将人工增雨潜力分为四个等级，其具体划分和增雨作业建议详情如下：

(1) 不适合：不满足作业条件，建议不作业。

(2) 一级：刚刚满足增雨条件，但效果一般，视情况增雨作业。

(3) 二级：满足增雨条件，作业效果较好，建议增雨作业。

(4) 三级：增雨条件最佳，建议积极增雨作业。

### 5.2 模糊逻辑识别系统设计

本文采用经典的模糊逻辑法对积层混合云增雨潜力等级进行分类，其流程框图如图 5 所示。其设计方法为：选择隶属函数，对每个输入增雨潜力指标进行模糊化，根据制定的规则库执行规则推理，然后进行规则合成，来获取所有规则的总集合，最后是退模糊处理，将合成的结果转换成各增雨潜力等级 ( $R_{Sj}$ ):

$$R_{Sj} = \sum_{i=1}^5 A_i^j P_{Si_j}, \quad (8)$$

其中， $A_i^j$  表示第  $i$  个输入参数对  $P_{Si_j}$  的权重系数， $P_{Si_j}$  为各输入量模糊化取值。图 5 中  $MBFi_j$  (Membership function) 为第  $j$  种增雨等级对应的第  $i$  个参数的隶属函数。根据数据质量、特点以及在

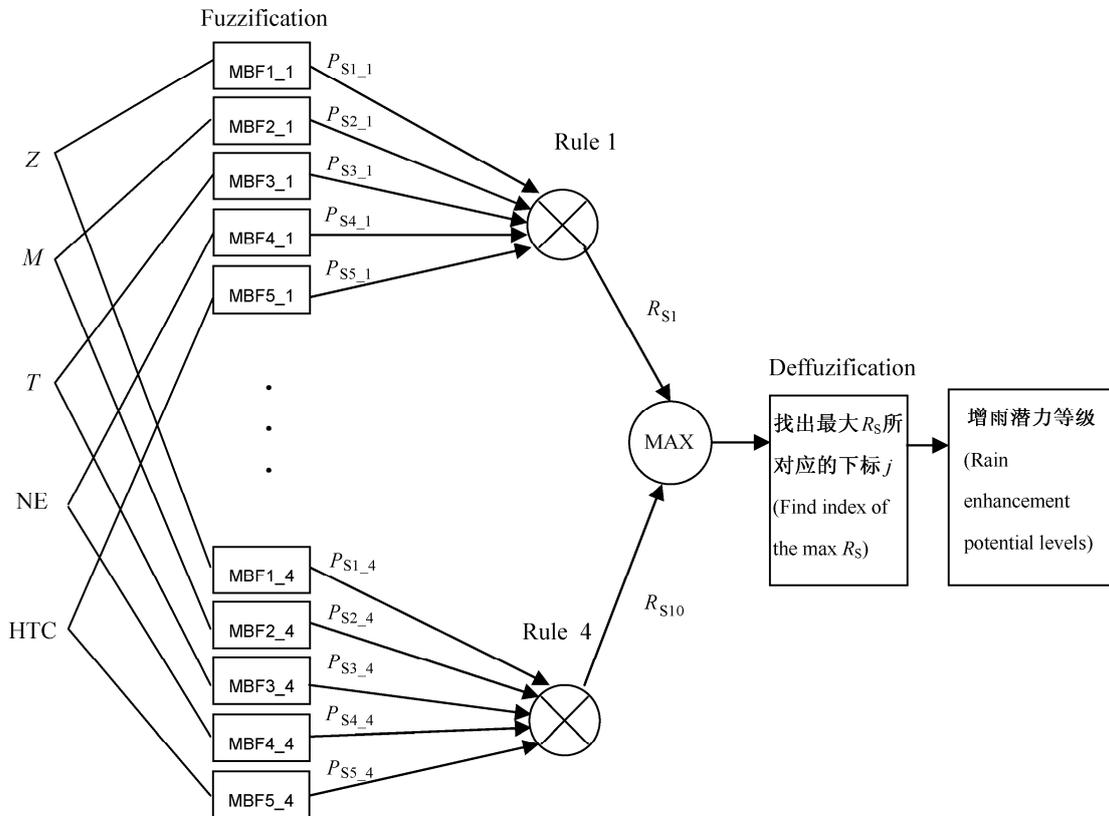


图 5 模糊逻辑增雨潜力等级识别系统框图

Fig. 5 Flow diagram of rain enhancement potential levels based on the fuzzy model and algorithm. Z, M, T, NE, and HTC represent reflectivity factor, particle water content, temperature, nucleation efficiency, and hydrometeor type classification. Inputs can belong to different fuzzy sets with different degrees of membership defined by a membership function ( $MBFi_j$ ). Rain enhancement potential levels ( $R_S$ ) is constructed by the product of the individual propositions ( $P_{Si_j}$ )

增雨潜力判断中的重要程度给出如下权重系数： $A_Z=0.6$ ,  $A_M=0.6$ ,  $A_T=0.3$ ,  $A_{NE}=0.4$ ,  $A_{HTC}=0.4$ ，温度  $T$  和碘化银活化率  $NE$  是紧密先关的，所以二者所占比例不能太高，粒子相态识别结果  $HTC$  本身也是一个模糊的结果，因此本文在识别过程中取值也较低。对于其他类型降水增雨潜力等级分类，可以对这些权重系数作进一步调整，以达到最科学分类。

### 5.3 隶属函数

由于  $\beta$  函数一阶导数连续，所以有利于原始数据对参数进行自动调节，再加之  $\beta$  函数有一个很长的尾巴，它可以改善模糊逻辑算法的鲁棒性（Robustness，指系统对参数扰动的不敏感性），因此本文选用  $\beta$  函数为隶属函数，其定义为

$$\beta(x, m, a, b) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-m}{a}\right)^{2b}}, \quad (9)$$

其中，参数  $a$  表示函数的宽度，参数  $b$  表示斜率，参数  $m$  表示的是函数的中心点。图 6 为含水量  $M$  的  $\beta$  隶属度函数曲线图，当  $M$  的作为变量输入时，不同增雨潜力等级会有相对应的返回值，如当  $M=0.3$  时，增雨潜力等级“一级”返回值是趋近于 0，“二级”和“三级”返回值是 1，这样就构成了模糊集合。

## 6 增雨潜力识别结果分析

2013 年 6 月 28 日受弱冷空气与副热带高压外围西南暖湿气流的共同影响，从 18 时开始，北京市自西向东先后出现较强降雨，雨量分布不均，其中东北部地区降雨量较大，多个区县发生雷雨、大风，个别区县出现小冰雹。由雷达组合反射率演变和 RHI 资料可知这是一次典型积层混合云降水过

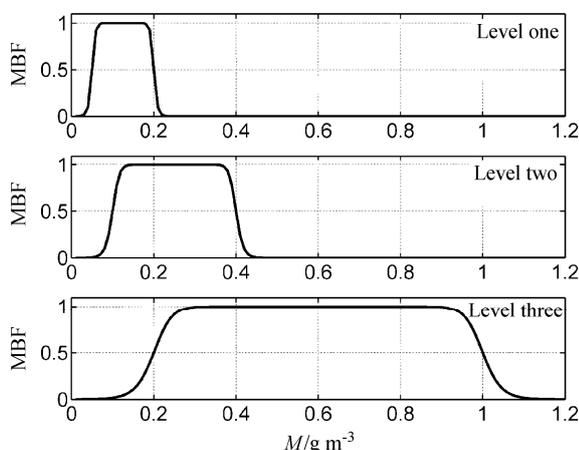


图 6 含水量  $M$  的隶属函数

Fig. 6 Membership function (MBF) of water content  $M$

程，属于积层连结型。此次降水是先产生多个对流单体，在西北气流影响下，各个对流单体逐步跨接、并合发展。对流单体由于跨接并合后能量叠加、水汽相互补充很快发展到最旺盛阶段，部分云顶高度达到 14 km。云系中雨量空间分布很不均匀，存在着多个液水含量中心，含水量约  $1\sim 3 \text{ g m}^{-3}$ ，局部高值区能达到  $4 \text{ g m}^{-3}$ 。然后是云系的扩展层化过程，云系在垂直方向的能量得到释放，水平方向也到充分混合，回波中心的强度和回波中心个数也明显减少，大于 30 dBZ 的回波高度由 12 km 减小到 8 km 左右，液水含量也呈减小趋势。到 23 时，云系已经具有层云降水特征，零度层亮带已清晰可见，逐步转为稳定性层状云降水。图 7 为 21:09 时以偏振雷达为中心，方位角  $91^\circ$ （正北为  $0^\circ$ ）、俯仰角  $1\sim 50^\circ$  的反射率  $Z$ 、含水量  $M$ 、粒子相态  $HTC$  和增雨潜力识别结果的 RHI 扫描的剖面图，属于典型的积层连结型积层混合云降水。从增雨潜力识别结果的垂直分布来看，大体可分为三层，一是零度层以下暖区降水为不合作业区域，这是因为在暖区虽然液水含量充沛，但是温度偏高已经不满足催化剂成核条件了；二是降水云层顶部和云层边缘也不适合增雨作业，在云层顶部虽然温度条件较好，但是云体稀薄，粒子数浓度和粒子含水量都较低；三是零度层以上的云体中间部位，这部分都处于一级增雨潜力区以上，是因为这部分有深厚的云体、合适的温度、较高的催化剂成核效率和较丰富的含水量。因此云体中间这部分区域也就成为研究的重点。由图 7 中增雨潜力识别结果可知，在  $3.5\sim 11 \text{ km}$  高度区间都具有增雨潜力，但增雨潜力等级分布并不均匀，在距离雷达站  $10\sim 30 \text{ km}$  的层云区，增雨潜力处于一级到二级，大部分都是一级增雨潜力区，只有在零下  $20^\circ\text{C}$  附近出现了二级增雨潜力区，对照该区域的  $Z$ 、 $M$ 、 $HTC$  等参数可知，回波强度约 25 dBZ 左右，粒子含水量在  $0.02 \text{ g m}^{-3}\sim 0.1 \text{ g m}^{-3}$ ，粒子类型主要是冰晶、雪和极少霰粒子，因此在这个区域受温度和催化剂成核效率的关系较大。增雨潜力较大的区域主要集中在距离雷达站  $40\sim 70 \text{ km}$  的对流云区，尤其是在对流发展旺盛对应的区域，可以达到增雨潜力二级或三级，这是因为该区域具有云体深厚、粒子浓度大、对流旺盛、粒子含水量大、 $\text{AgI}$  活化率高有利因素。

图 8 为 2011 年 7 月 24 日一次水平混合型的积层混合云降水过程，该系统受西北气流影响，先出

现大面积层云降水，在东移过程中激发对流，但是在垂直方向发展缓慢，最后向水平方向扩散减弱，由反射率因子 Z 可看出，对流在垂直方向上发展较弱，30

dBZ 回波顶高最高达到 8 km，且无明显回波中心。由图 8 所示增雨潜力等级识别结果可知，其大体结构与图 7 积层连结型相似，可增雨区域集中在云体中

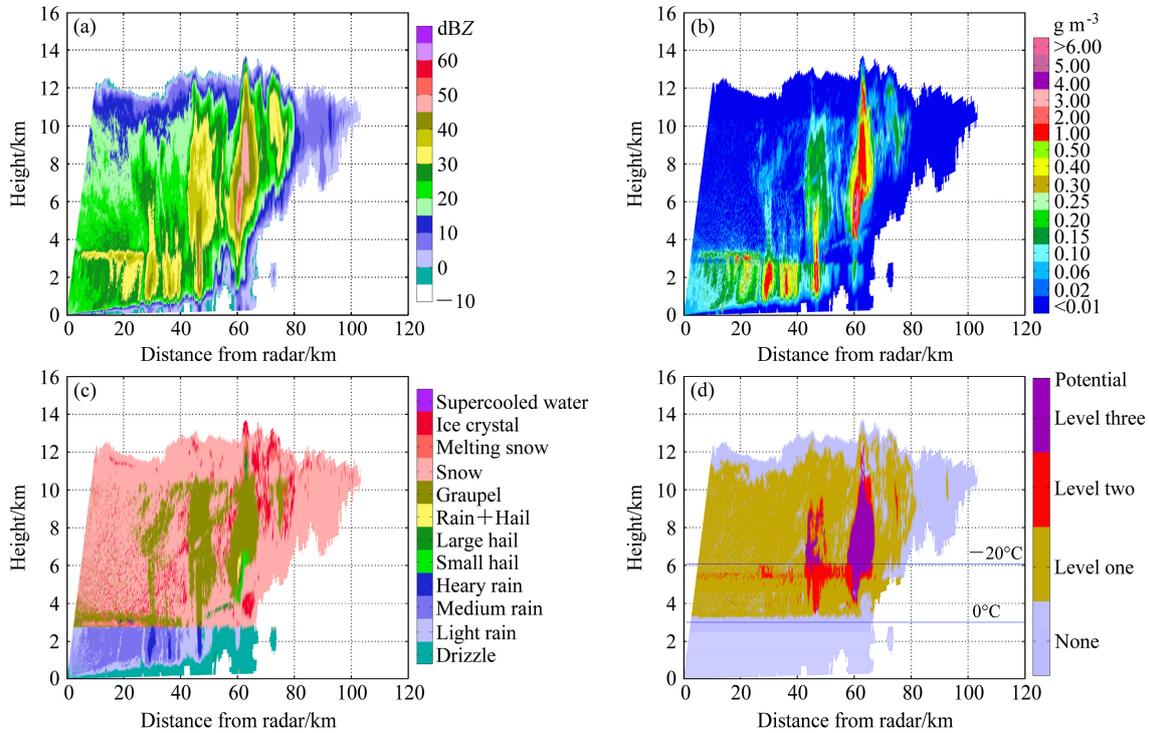


图 7 2013 年 6 月 28 日 21:09 时 (a) 反射率 Z、(b) 含水量 M、(c) 粒子相态 HTC 和 (d) 增雨潜力识别结果的垂直分布。方位角：91°，俯仰角：1°~50°  
Fig. 7 Vertical distributions of (a) reflectivity factor Z, (b) particle water content M, (c) hydrometeor type classification (HTC), and (d) identification results of rain enhancement potential levels at 2109 BJT 28 June 2013. Azimuth: 91°; elevation angle: 1°~50°

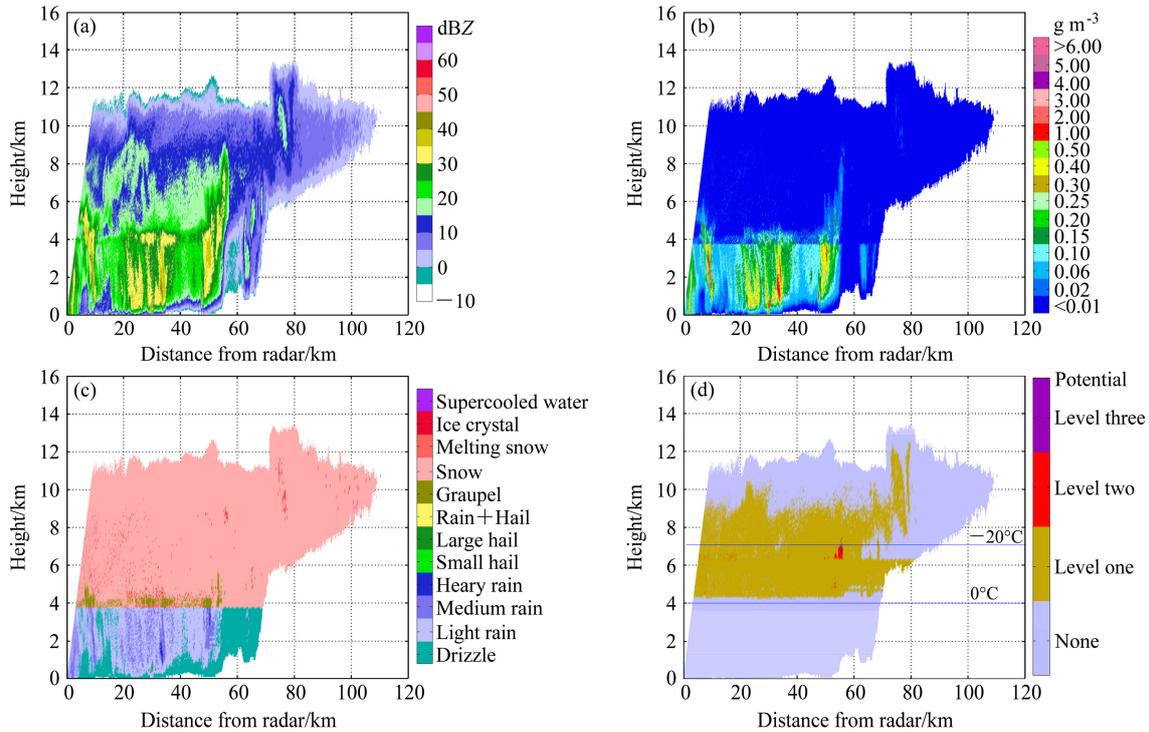


图 8 同图 7，但为 2011 年 7 月 24 日 19:05 的垂直分布。方位角：67°，俯仰角：1°~50°  
Fig. 8 As in Fig. 7, but for vertical distributions at 1905 BJT 24 July 2011. Azimuth: 67°; elevation angle: 1°~50°

部,几乎都只能达到一级增雨潜力,只有在对流最强的区域能达到二级增雨潜力,主要是由于水平混合型在垂直方向发展较弱,导致暖区液态水很难被上升气流抬升冷云区,加之零度层以上主要以雪粒子为主,霰粒子含量较少,所以增雨潜力较差。

图9为2013年6月24日一次典型的开式流场型降水,受冷空气南下影响,北京自西向东先后出现雷阵雨天气,雨量分布不均,局地短时雨强较大,其中东部地区降雨量最大。由反射率可知云系在垂直方向有爆发式增长,大于50 dBZ的强回波中心高度达到7 km。增雨潜力识别结果表明在强回波中心附近出现最佳增雨区,增雨潜力等级大于二级。对比粒子含水量和粒子相态产品可知,在距离雷达站10 km~30 km、高度在3.5 km~8.2 km这片区域中,粒子含水量 $M$ 值在 $0.15 \text{ g m}^{-3} \sim 1.5 \text{ g m}^{-3}$ ,粒子相态识别产品显示云中粒子主要是霰粒子,这说明云中有丰富的液态水。如果AgI活化后也能形成霰粒子,则它可快速的吸收和碰并云中这些液态水,从而增长并形成降水。

从上述三种类型降水识别结果来看,基于偏振雷达的增雨潜力区识别结果表明积层混合云降水中层云区的催化潜力一般,对流云区可增雨潜力远

大于层云区,开式流场型与积层连结型可增雨潜力大于水平混合型。通过分析这三种类型的积层混合云降水发现,当降水云中出現霰粒子时,其周边一般会有较好的增雨潜力,但零度层中霰粒子除外。

## 7 增雨潜力识别结果可信度分析

增雨潜力识别结果是否可信以目前的技术和探测手段很难通过实际观测资料来有效验证,一是因为在同一次增雨作业中不同等级的潜力区域不一定都具备作业条件(或在炮射范围内、或没有空域批复);二是降水过程十分复杂,即使满足了前一个因素,也不能完全确定有多少影响是人工催化的结果。因此本文设计了两个验证方案,尽可能从某一方面来对增雨潜力识别结果进行检验。一是利用偏振雷达实际探测资料选择增雨潜力较好的区域,从回波强度、顶高、粒子相态等来分析增雨作业前后的变化情况;二是利用数值模式在积层混合云中的三个不同部位播撒催化剂,分析其催化效果。

### 7.1 偏振雷达增雨效果分析

受冷锋低槽影响,2011年9月7日下午开始,北京东北部地区出现雷阵雨天气,北京市人工影响天气办公室于15时22分,在密云区黑龙潭作业点

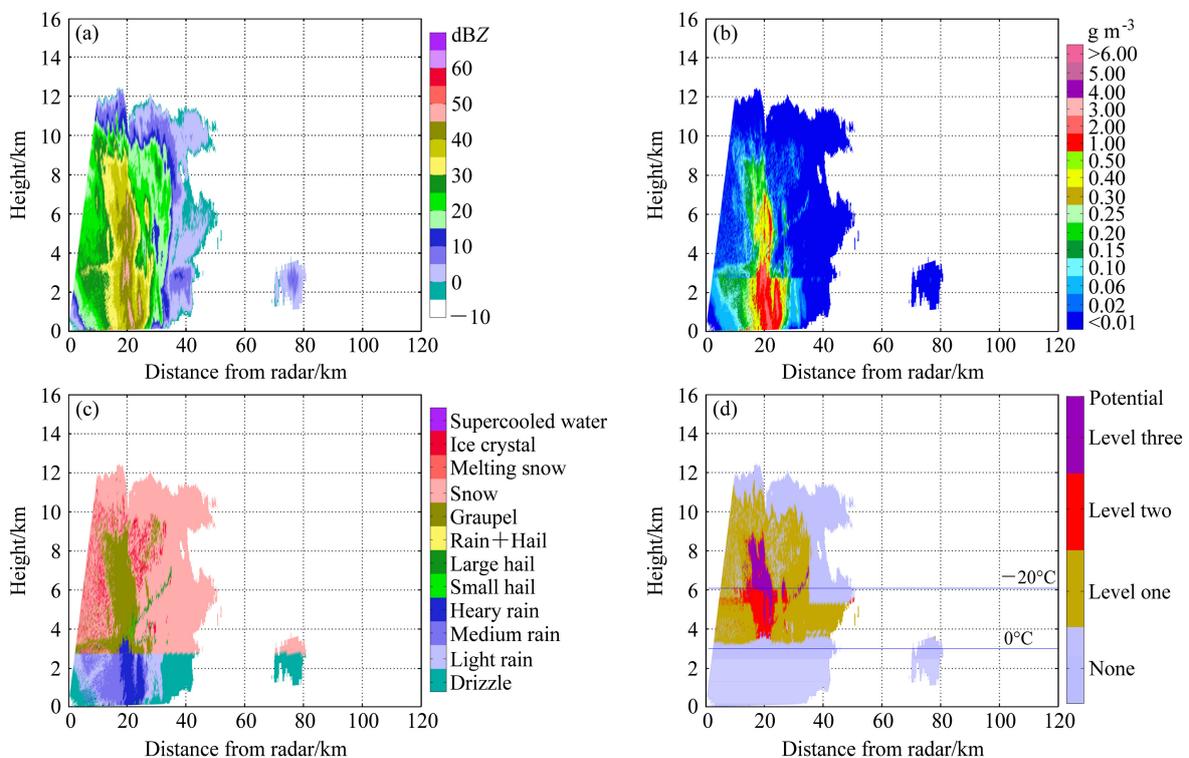


图9 同图7,但为2013年6月24日17:41的垂直分布。方位角:271°,俯仰角:1°~50°

Fig. 9 As in Fig.7, but for vertical distributions at 1741 BJT 24 June 2013. Azimuth: 271°; elevation angle: 1°~50°

开展了增雨作业，共发射火箭弹 3 枚，发射仰角大于 60°，催化剂播撒高度为 4~6 km。密云区黑龙潭作业点位于雷达站东北方向 77°（正北为 0°）、距离

88 km 处，其作业影响区域如图 10 矩形红框所示。图 10 给出了增雨作业前、后三个时刻的反射率（已经过衰减订正）、粒子含水量、粒子相态、增雨潜

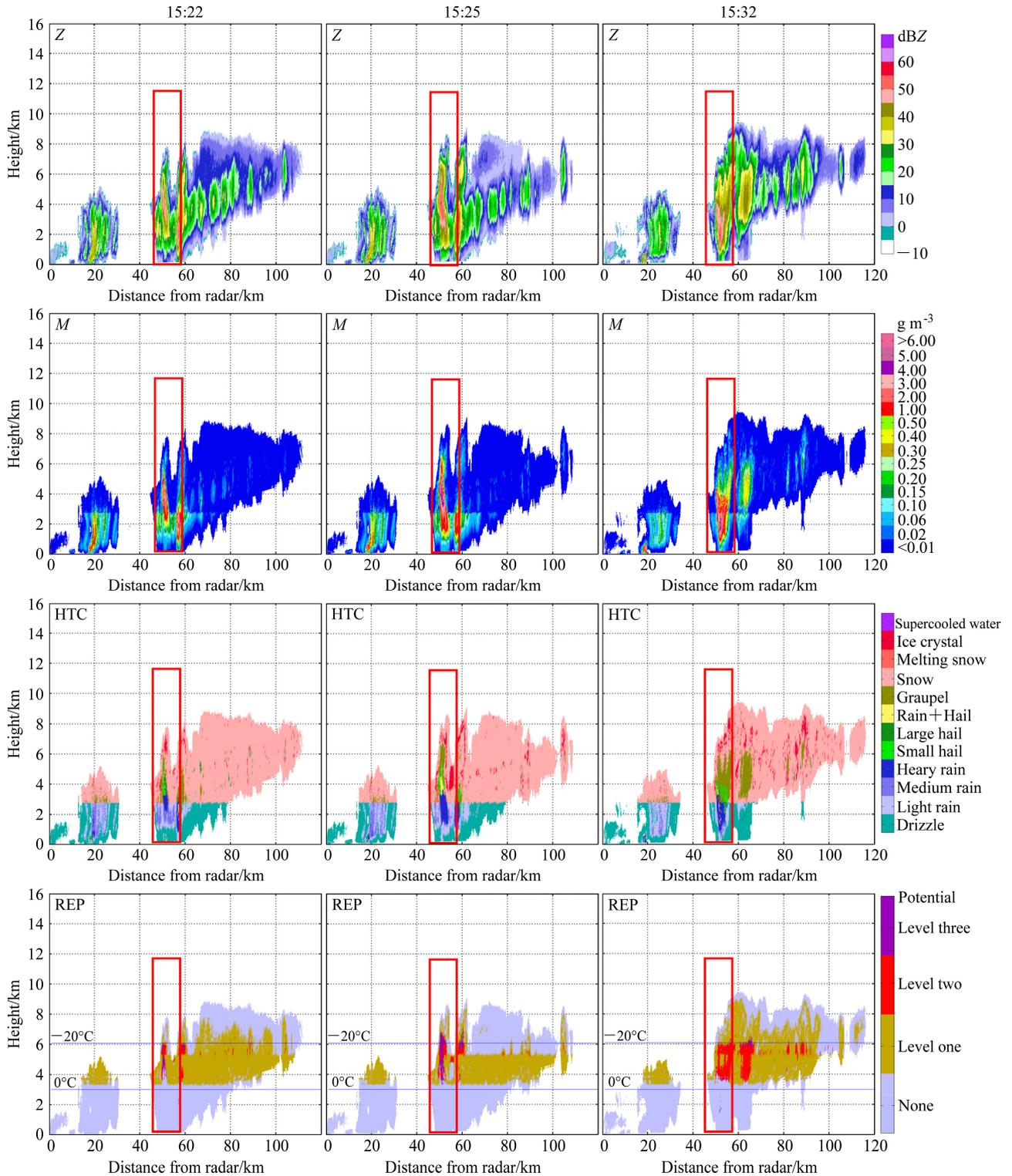


图 10 2011 年 9 月 7 日 15:22 (左)、15:25 (中)、15:32 (右) 增雨效果分析 (红框表示催化作业区域)。方位角: 77°, 俯仰角: 1°~50°

Fig. 10 Effects of rain enhancement at 1522 BJT (left column), 1525 BJT (middle column), and 1532 BJT (right column) on 7 September 2011. Red box: cloud seeding area. Azimuth: 77°; elevation angle: 1°~50°

力识别的变化情况。由 15:22 时所示作业区上空反射率强度为 0~30 dBZ, 回波中心强度 15~30 dBZ, 其对应的高度为 4~7 km, 恰好处于催化影响区, 粒子含水量约为  $0.1 \text{ g m}^{-3}$ , 粒子相态为雪粒子中含有少量冰晶, 增雨潜力识别结果显示在 4~7 km 之间均为可增雨区, 在 5~6.5 km 之间增雨等级高达二级到三级, 说明虽然在回波较弱的区域, 也可能存在较大的增雨潜力。作业 3 分钟后 (15:25 时) 回波强度无明显变化, 虽然往云中播撒了大量的人工冰核, 但是由于时间较短, 冰核吸食增长后尺度仍然较小, 只有部分冰核通过凝华增长形成冰晶, 从 15:25 时粒子相态识别结果也可验证, 冰晶数量明显增多, 但是小粒子对反射率的贡献很小, 所以反射率的强度不会有太大变化, 但是大于 15 dBZ 的回波面积有增大趋势。作业 10 分钟后 (15:32 时), 催化影响区内粒子相态变化较快, 绝大部分人工冰核已凝华增长成冰晶, 回波中心区域温度和液态水配置较好, 已有部分粒子通过淞附增长形成了霰粒子, 由粒子相态识别结果可以证实这一个过程, 霰粒子的生成将有利于提高降水量。同时可以看到回波顶高 (大于 15 dBZ) 也由作业前的 7 km 增长到 8.5 km, 这将延长该云块的降水时间, 从另一个方面说明有利于增加降水量。在对其他降水个例分析中发现, 当催化剂播撒到增雨潜力识别等级为二级或三级的区域时, 绝大部分个例增雨效果明显, 而催化剂播撒到增雨潜力识别等级为一级的区域时, 其中部分个例有一定的增雨效果, 但也有部分个例很难用雷达观测发现增雨前后的变化。

## 7.2 数值模式结果对比分析

本文利用耦合了碘化银催化方案的 WRF 中尺度模式对 2012 年 5 月 29 日华北地区的一次积层混合云降水个例进行了增雨催化模拟研究。耦合的碘化银催化方案全面考虑了碘化银的四种核化机制, 即凝华核化、凝结冻结核化、接触冻结核化及浸润冻结核化机制以及碘化银粒子随气流的平流与扩散等过程。本次模拟所得形势场与 NCEP 数据形势场基本一致, 24 小时降水量及落区与实测降水量及分布大致相同, 所以本文模拟可以描述本次自然降水过程。依据模拟的 5 月 29 日 12:00 雷达回波强度 (组合反射率)、云水含量以及上升气流的大小将云系分为对流云区、层云状与对流入口区。分别在对流云区、层云区与对流入口区 (图 11) 的九个格点播撒 100 g 碘化银后, 催化作业影响区地面累积

雨量变化情况如图 12 所示。可以看出, 在播撒 30 分钟后降雨量增量开始出现负效果, 对流云区最为明显, 减小的速度和幅度也是最大, 其次分别是对流入口区和层云区。播撒催化 135 分钟后, 对流云

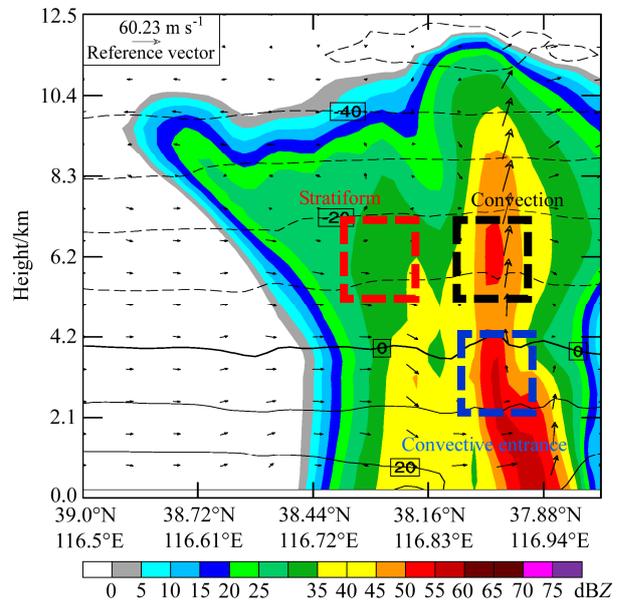


图 11 模拟的 2012 年 5 月 29 日 12:00 叠加在温度与流场上的雷达回波垂直剖面图。实 (虚) 线代表温度的正 (负) 值, 黑框代表对流云区, 蓝框代表对流入口区, 红框代表层云区

Fig. 11 Simulated vertical cross section of radar echo superposed on the temperature and airflow field at 1200BT on 29 May 2012. Solid (dashed) lines: positive (negative) temperature; black box: convective area; blue box: convective entrance; red box: stratiform cloud area

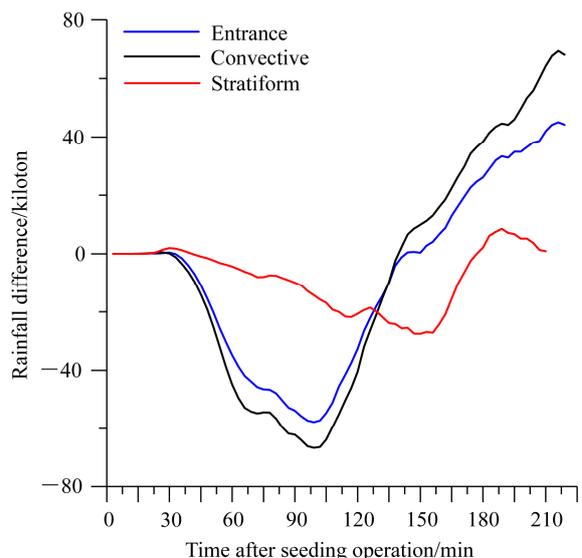


图 12 2012 年 5 月 29 日 12:00 催化作业影响区内催化作业与未催化作业地面累积雨量差值变化

Fig. 12 Differences of accumulated surface rainfall between seeded and unseeded by AgI at 1200BJT on 29 May 2012

区降雨量增量开始出现正效果，而对流入口区和层云区出现增雨正效果的时间依次晚之。200 分钟后三个对比区增雨效果都基本达到最佳值，可以清晰地看到在对流云区播撒增雨效果最好，在对流入口区播撒效果其次，在层云区播撒催化效果最差。通过与偏振雷达增雨潜力区识别结果对比发现二者结论基本一致，都表明积层混合云降水中层云区增雨潜力不大，对流云区增雨潜力要远大于层云区，因此可以说明基于偏振雷达的增雨潜力区识别结果是可信的。

## 8 结论与讨论

本文通过研究积层混合云降水机制和特点，讨论了人工增雨潜力指标和范围，并利用偏振雷达对积层混合云三种类型降水进行了增雨潜力区域识别，得出如下结论：

(1) 在研究积层混合云降水机制时对北京地区近三年降水进行统计并分类，发现积层混合云降水共 95 次，约占总降水次数的 61%，其中积层混合云降水以积层连结和水平混合型为主，二者之和近 80%。

(2) 通过重点分析积层混合云中对流和层云两种不同特点降水类型的降水宏观结构和粒子相态、各种粒子比例、含水量等垂直分布特征，确定了增雨潜力识别指标取值范围，同时也根据研究现状和人影需求总结制定出人工增雨潜力等级。

(3) 基于偏振雷达模糊逻辑识别法识别出增雨潜力区表明，对流云区可增雨潜力远大于层云区，开式流场型与积层连结型可增雨潜力大于水平混合型，通过分析这三种类型的积层混合云降水发现，当降水云中出現霰粒子时，在霰粒子附近的大部分区域会有较好的增雨潜力。

(4) 通过数值模式试验结果与偏振雷达识别增雨潜力区对比发现，二者结果基本一致，都表明层云区增雨效果不明显，对流云区增雨效果要明显好于层云区。

(5) 基于偏振雷达的模糊逻辑增雨潜力区识别法可进行实时运算，有条件植入现有粒子相态识别系统中，生成实时的增雨潜力产品进行人工增雨作业指挥。

增雨潜力区域的识别是一个非常复杂的科学问题，与很多因素有关，本文虽然从降水云系的垂直结构、反射率强度、粒子含水量、温度、碘化银

活化率、粒子相态等多方面因素进行了分析，但增雨潜力受不同降水类型、不同发展阶段等影响会存在多样性，所以增雨潜力的后续研究工作可以讨论更多相关指标，尽量避免片面性和局限性。

**致谢** 感谢马建立、毕凯、金永利、秦睿为本文提供的偏振雷达粒子相态识别结果验证统计数据以及对本文提出的宝贵意见。

## 参考文献 (References)

- 毕永恒, 刘锦丽, 段树, 等. 2012. X 波段双线偏振气象雷达反射率的衰减订正 [J]. 大气科学, 36 (3): 495-506. Bi Yongheng, Liu Jinli, Duan Shu, et al. 2012. Attenuation correction of reflectivity for X-band dual-polarization radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (3): 495-506, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11075.
- Chappell C F, Johnson F L. 1974. Potential for snow augmentation in cold orographic clouds [J]. J. Appl. Meteor., 13 (3): 374-382, doi:10.1175/1520-0450(1974)013<0374:PFSAIC>2.0.CO;2.
- 陈羿辰, 刘锦丽, 段树, 等. 2012. X 波段双极化雷达在北京夏季降水估测中的应用 [J]. 气候与环境研究, 17 (3): 292-302. Chen Yichen, Liu Jinli, Duan Shu, et al. 2012. Application of X-band dual polarization radar in precipitation estimation in summer of Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (3): 292-302, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.10115.
- 陈羿辰, 张龙斌, 金永利, 等. 2016. 利用双线偏振雷达分析人工防雹作业效果 [J]. 气象科技, 44 (3): 479-488. Chen Yichen, Zhang Longbin, Jin Yongli, et al. 2016. A case study of effectiveness of artificial hail suppression based on dual polarization radar data [J]. Meteor. Sci. Technol., 44 (3): 479-488, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2016.03.022.
- Greene D R, Clark R A. 1972. Vertically integrated liquid water—A new analysis tool [J]. Mon. Wea. Rev., 100 (7): 548-552, doi:10.1175/1520-0493(1972)100<0548:VILWNA>2.3.CO;2.
- 洪延超, 周非非. 2006. 层状云系人工增雨潜力评估研究 [J]. 大气科学, 30 (5): 913-926. Hong Yanchao, Zhou Feifei. 2006. The study of evaluation of potential of artificial precipitation enhancement in stratiform cloud system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 913-926, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.20.
- 胡志晋. 2001. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨 [J]. 应用气象学报, 12 (增刊): 10-13. Hu Zhijin. 2001. Discussion on mechanisms, conditions and methods of precipitation enhancement in stratiform clouds [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 12 (S): 10-13, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2001.z1.002.
- 黄美元, 洪延超. 1984. 在梅雨锋云系内层状云回波结构及其降水的不均匀性 [J]. 气象学报, 42 (1): 80-87. Huang Meiyuan, Hong Yanchao. 1984. The inhomogeneous features of the precipitation and the echo structure of stratiform cloud in Meiyu frontal cloud system [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 42 (1): 80-87, doi:10.11676/qxxb1984.008.
- 黄美元, 洪延超, 徐华英, 等. 1987a. 层状云对积云发展和降水的影响——一种云与云之间影响的数值模拟 [J]. 气象学报, 45 (1): 72-77. Huang Meiyuan, Hong Yanchao, Xu Huaying, et al. 1987a. The effects of the existence of stratiform cloud on the development of cumulus cloud and its precipitation [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 45 (1): 72-77,

- doi:10.11676/qxxb1987.009.
- 黄美元, 洪延超, 吴玉霞, 等. 1987b. 梅雨锋云系和降水的若干研究 [J]. 大气科学, 11 (1): 23–30. Huang Meiyuan, Hong Yanchao, Wu Yuxia, et al. 1987b. Some studies on Meiyu frontal cloud system and its precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 11 (1): 23–30, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1987.01.03.
- 黄燕, 徐华英. 1994. 播撒碘化银粒子进行人工防雹的数值试验 [J]. 大气科学, 18 (5): 612–622. Huang Yan, Xu Huaying. 1994. Numerical experiments on hail suppression by AgI seeding [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (5): 612–622, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.05.12.
- 雷恒池, 魏重, 沈志来, 等. 2001. 微波辐射计探测降雨前水汽和云液水 [J]. 应用气象学报, 12 (增刊): 73–79. Lei Hengchi, Wei Chong, Shen Zhilai, et al. 2001. Microwave radiometric measurement on water vapor and cloud liquid water before rainfall [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 12 (S): 73–79, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2001.z1.010.
- 林磊, 姚展予. 2011. 华北地区一次积层混合云降水的数值模拟研究 [J]. 气象, 37 (12): 1473–1480. Lin Lei, Yao Zhanyu. 2011. Numerical study on the complex of the stratiform clouds and embedded convective clouds of North China [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 37 (12): 1473–1480.
- 唐仁茂, 李德俊, 袁正腾, 等. 2012. 对流云人工增雨雷达效果分析软件的应用 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 871–883. Tang Renmao, Li Dejun, Yuan Zhengteng, et al. 2012. Application of seeding effect analysis software for convective cloud rainfall enhancement with radar products [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 871–883, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.24.
- 汪学林, 谷淑芳, 于勇, 等. 2001. 两次江淮气旋的云雨特征及其人工播云效果的综合分析 [J]. 应用气象学报, 12 (增刊): 48–57. Wang Xuelin, Gu Shufen, Yu Yong, et al. 2001. Two case studies of characteristics of rains and clouds over Jianghuai cyclone and the composite analysis of artificial seeding effectiveness [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 12 (S): 48–57, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2001.z1.007.
- 王以琳, 刘文, 王广河. 2002. 冷云人工增雨催化区的探空判据 [J]. 气象学报, 60 (1): 116–121. Wang Yilin, Liu Wen, Wang Guanghe. 2002. Sounding criterion of cold cloud catalysis [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 60 (1): 116–121, doi:10.11676/qxxb2002.014.
- 吴志会, 段英, 张晶, 等. 2005. 不同降水天气系统自然降水特征及火箭人工增雨潜力分析 [J]. 气象科技, 33 (增刊): 14–20. Wu Zhihui, Duan Ying, Zhang Jing, et al. 2005. Characteristics of natural precipitation under various weather systems in different seasons and potential of rocket rainfall enhancement [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 33 (S): 14–20.
- 肖卉, 白卡娃, 王可法, 等. 2008. 江苏省火箭人工增雨作业指标研究 [J]. 气象科学, 28 (4): 440–443. Xiao Hui, Bai Kawa, Wang Kefa, et al. 2008. A study on some operation indices of artificial precipitation over Jiangsu Province [J]. Scientia Meteor. Sinica (in Chinese), 28 (4): 440–443, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2008.04.015.
- Marshall J S, Palmer W M. 1948. The distribution of raindrops with size [J]. Journal of Meteorology, 5 (4): 165–166.
- Reisner J, Rasmussen R M, Bruintjes R T. 1998. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 124 (548): 1071–1107, doi:10.1002/qj.49712454804.
- Vardiman L, Moore J A. 1978. Generalized criteria for seeding winter orographic clouds [J]. J. Appl. Meteor., 17 (12): 1769–1777, doi:10.1175/1520-0450(1978)017<1769:GCFSWO>2.0.CO;2.