

翟菁, 黄勇, 胡雯, 等. 一次积层混合云降水过程增雨条件分析[J]. 气象, 2010, 36(11): 59-67.

一次积层混合云降水过程增雨条件分析^{* 1}

翟菁^{1,4} 黄勇¹ 胡雯² 蒋年冲² 陈晓红² 曾光平³

1 安徽省气象科学研究所, 合肥 230031

2 安徽省气象局, 合肥 230031

3 福建省气象科学研究所, 福州 350001

4 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081

提 要: 基于中尺度数值模式 MM5, 新一代天气雷达、静止气象卫星和雨量等观测资料, 对安徽省秋季早期一次降水过程的增雨条件进行了分析。首先, 模式预报的云降水结构与实况在总降水量及分布、云系回波特征、移动趋势方面基本一致, 模式产品具有一定可信度, 对云降水结构的分析表明, 云中具有一定过冷云水且配合有上升气流的存在, 这是有利的增雨条件。在此基础上, 基于 MM5 模式结果计算了冰面过饱和度, 散度差, K 指数和 850 hPa 水汽含量, 并由此得到综合增雨潜力指标, 将指标与云结构、降水和卫星雷达资料进行对比, 结果表明这些指标揭示了云系中有利于增雨作业的动力、热力、微物理条件, 对云系发展和降水过程有良好指示意义, 与雷达卫星的观测结果较一致。最后, 卫星反演产品、雷达回波以及雷达反演产品如垂直积分液态水含量、回波顶高等特征与模式描述的云系结构特征一致, 可判断作业的具体位置和时间, 数值模式产品与观测资料结合为人工增雨作业提供了及时精确的指导。

关键词: 增雨, 中尺度模式, 新一代天气雷达

Analysis on Conditions of Precipitation Enhancement Catalyzing Operation Based on Mesoscale Model, CINRAD, and Satellite

ZHAI Jing^{1,4} HUANG Yong¹ HU Wen² JIANG Nianchong² CHEN Xiaohong² ZENG Guangping³

1 Anhui Research Institute of Meteorological Science, Hefei 230031

2 Anhui Meteorological Bureau, Heifei 230031

3 Fujian Research Institute of Meteorological Science, Fuzhou 350001

4 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification, CMA, Beijing 100081

Abstract: The artificial precipitation condition of a case during November 15–16, 2006 in Anhui Province is studied based on the mesoscale model data, CINRAD data, geostationary meteorological satellites data, etc. First, the model results are validated by observed data, such as rainfall, the characteristics of cloud system's radar echo, and the moving trend. The analysis on the structure of the cloud and precipitation shows that the existence of supercooled cloud water with updraft is favorable for artificial precipitation operation. Then, an index for artificial precipitation condition is calculated based on the model results, which actually include the ice supersaturation, K index, divergence difference, and the 850 hPa specific humidity. All these indexes are contrasted between the cloud structure, rainfall, and other observed data such as radar, satellite, the results show that these indexes illuminate the favorable dynamic, thermodynamic, and microphysical conditions in cloud system, which could be a precursor to the cloud system's moving and developing, and also these indexes fit with the observed data well. At last, the characteristics of satellite retrieval data, radar echo, and radar retrieval data such as ET (echo top), VIL (vertical integrated liquid), are in accord with the model's results, so the accurate position and time for artificial precipitation could be

* 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题 2009008, 国家自然科学基金 40675001“江淮夏季对流云合并的观测和机理研究”, 国家自然科学基金 40905019“江淮流域强天气过程中对流云合并现象之地空联合观测研究”共同资助

2009 年 6 月 11 日收稿; 2010 年 3 月 20 日收修定稿

第一作者: 翟菁, 主要从事云降水物理和中尺度模拟工作. Email: zj8732709@163.com

given. This is how the model results are used with observed data in this case for artificial precipitation.

Key words: artificial rainfall, mesoscale model, CINRAD (China New generation weather radar)

引 言

安徽省旱涝频繁,又地处气候过渡带,在这种较为复杂的气候背景下,如何及时准确地分析增雨作业的条件,把握作业时机和地点,选择适当的催化手段,是科学开展增雨作业的重要条件。研究人员曾经从多方面对增雨作业的条件进行相关研究^[1-18]。早期的研究大多是利用作业前探测的数据,结合经验性作业指标来确定作业区域和方法,如法国的云物理飞机在西班牙进行云探测时将过冷水含量大于 $0.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和冰晶浓度小于 0.1 L^{-1} 的航线占总探测航线的百分比作为过冷指标;国内的研究大多建立在对云的微物理结构观测基础上^[1-7],近年来随着数值模式的发展,数值模式预报产品也被逐步应用于云降水和增雨潜力的分析^[8-17],如黄毅梅等将数值模式产品与实况观测资料结合用于人工增雨可播区域自动选择^[8],叶建元等将多种观测资料与数值模式产品结合针对对流云进行人工增雨作业等级预报^[9]。这其中针对我国北方层状降水云系的研究

较多,而针对我国南方常见的降水云如对流云、积层混合云的研究相对起步较晚。安徽省的增雨对象包含层状云、对流云和积层混合云等多种云体,本文以安徽省 2006 年秋季早期 11 月一次积层混合云降水过程为例,使用中尺度数值模式 MM5 产品得到增雨潜力指标,对降水过程的增雨潜力大小和分布进行预报,将模式预报产品与降水实况、新一代天气雷达、卫星观测资料结合进行验证,对云系的结构和微物理特征进行分析,提出一种以中尺度模式来帮助实现增雨潜力潜势预报的思路。

1 天气实况及作业情况简介

2006 年 10 月上旬,鄂霍茨克海到我国东北维持一深厚的低压区,安徽省受高低空一致西北气流控制,旱情一直持续。11 月 15 日,东亚维持数天的两槽一脊形势开始调整,由图 1 可见:黑海到里海以北的低槽和华东沿海大槽减弱北缩,两槽之间东亚中纬度上空,出现数个不稳定小槽以阶梯槽形势东移南下,使南北向高压趋于减弱,经向型环流向纬向

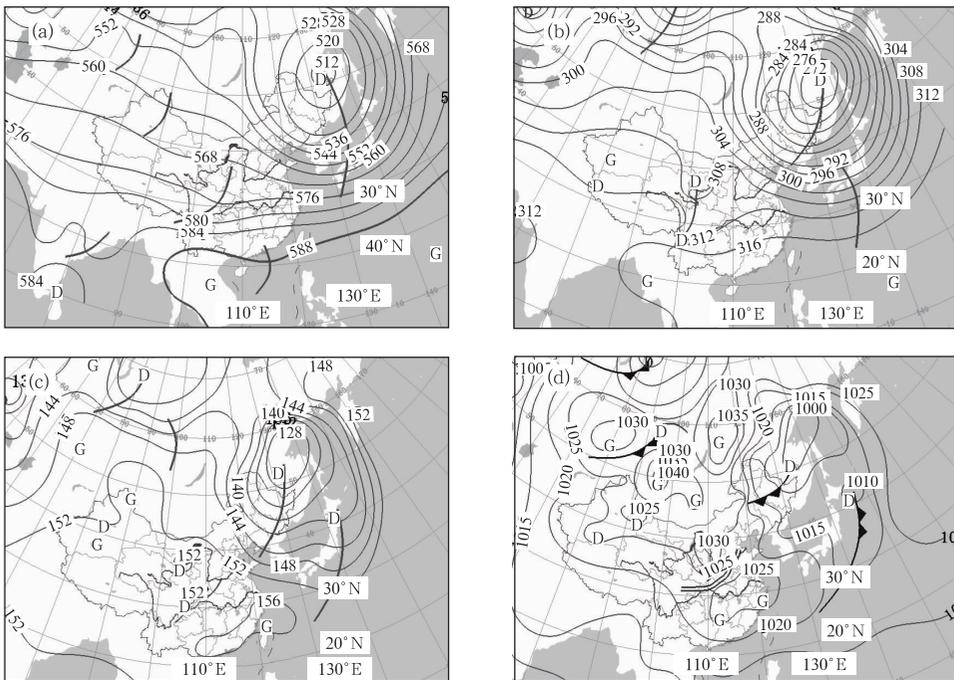


图 1 2006 年 11 月 15 日 08 时天气形势图

(a) 500 hPa; (b) 700 hPa; (c) 850 hPa(单位:dagpm); (d) 地面(单位:hPa)

Fig.1 Synoptic maps at 08:00 BT November 15, 2006

(a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa (unit:dagpm), (d) surface (unit:hPa)

型发展。对应地面图上,维持在河套到长江中下游地区的 L 型高压,主体北缩,强度减弱,1028 和 1043 hPa 高压中心分别位于浙江奉化和贝加尔湖西部,两高之间经天津、安阳、南阳、老河口、万源到平武一线为一辐合线。受地面辐合线及 700 hPa 和 850 hPa 分别位于张掖、兴海到贡山一线和临汾、房县、南充到会理一线低槽和切变线共同影响,安徽省淮河以南出现弱降水。在这一天气背景下 11 月 16 日凌晨在安徽省南部山区开展了人工增雨作业。

2 基于中尺度模式的云降水结构分析

为了对增雨作业提供科学的指导和参考,可以利用模式产品得到云系结构、适合增雨作业区域的分布和变化趋势的预报。模式选用安徽省气象台业务运行的中尺度数值模式 MM5,模式分三层嵌套,

文中分析使用的是第三层产品,该层网格距 6 km,显式方案采用霰方案。图 2 给出 2006 年 10 月 15 日 17 时至 16 日 08 时安徽境内的降水分布图以及 MM5 模式产品得到的同时段的降水分布图,可见实况降水分布在安徽中部和南部,中部降水量大于南部,中心位于 31.5°N 、 116.5°E 附近,过程总降水量最大达到 20 mm 以上;而模式预报的降水量总体上比实况降水量偏小,过程总降水量最大达到 8 mm 以上,也呈现出中部地区降水大于南部的特点,降水中心位于六安一带,比实况偏北大约 0.5 个纬度。模式预报的降水主要出现在 16 日凌晨 00—07 时,比实况降水出现的时间晚几个小时。虽然模式预报的降水量和实况存在一定偏差,但总的来说模拟降水分布和量级与实况还是较为接近的,因此可以基于模式结果进一步分析云降水结构。

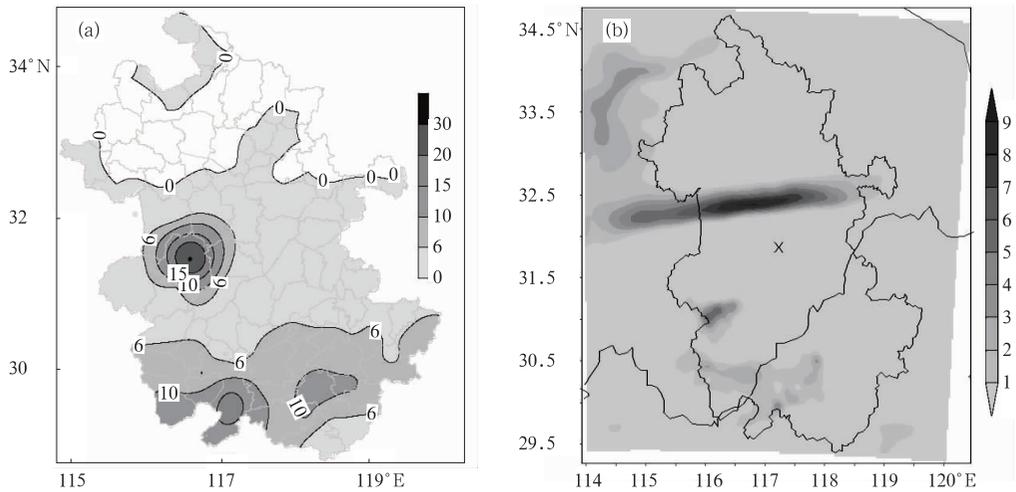


图 2 2006 年 11 月 15 日 17 时至 16 日 08 时实况降水(a)和 MM5 模式产品得到的同时段降水分布图(b)(单位:mm)

Fig. 2 Observed rainfall distribution (a) and the rainfall obtained from MM5 model results (b) (unit:mm) during 17:00 BT 15 to 08:00 BT 16 November, 2006

图 3 给出主要降水时段中 0.5° 仰角的雷达回波图与模式模拟的垂直积分云水含量、逐时降水之间的对比。根据雷达资料,云系影响安徽地区的时间在 15 日 12 时至 16 日 06 时,这里雷达回波给出的时次分别为 15 日 12 时(图 3a₁)、18 时(图 3a₂)、16 日 03 时(图 3a₃),而模式结果中云系影响安徽的时间段是 15 日 22 时至 16 日 07 时,图中给出 15 日 23 时(图 3b₁)、16 日 03 时(图 3b₂)、06 时(图 3b₃)三个时次的垂直积分云水含量分布图。模拟降水出现时刻为 16 日 00 时,03 时前后是降水的高峰期,图中给出 16 日

00 时(图 3c₁)、03 时(图 3c₂)、06 时(图 3c₃)这三个时次的逐时降水分布图,图 4 到图 6 重点对 03 时的云降水结构进行分析。首先从雷达回波图可以看出云系自西北向东南逐渐移动的过程,絮状回波强度在 35 dBz 以下,呈现积层混合云的特征。从模拟的云水含量图看,云系的移动趋势同样是自西北向东南逐渐移动。图 4 沿图 3c₂ 中 AB、CD 线位置进行剖面,并给出实况雷达回波沿图 3a₂ 中 EF 线的剖面进行对比,图中模拟雷达回波也普遍在 35 dBz 以下,模拟和实况的剖面图都显示云系较低,实况剖面图中回波高

度在 7 km 以下,而模拟的雷达回波剖面位于 700 hPa 以下。同一时刻模拟的雷达回波平面图可见(图 4a),对应 03 时 AB 线的降水应是由一东西走向带状云系产生($2.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$),这条带状回波只在 850 hPa 以

下回波图上可见,而西南部 CD 线附近的云系产生的降水较弱($1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$),在 700 hPa 以下有回波(图略),可见对应 AB 线位置的降水主要是由 850 hPa 低层云系产生的。

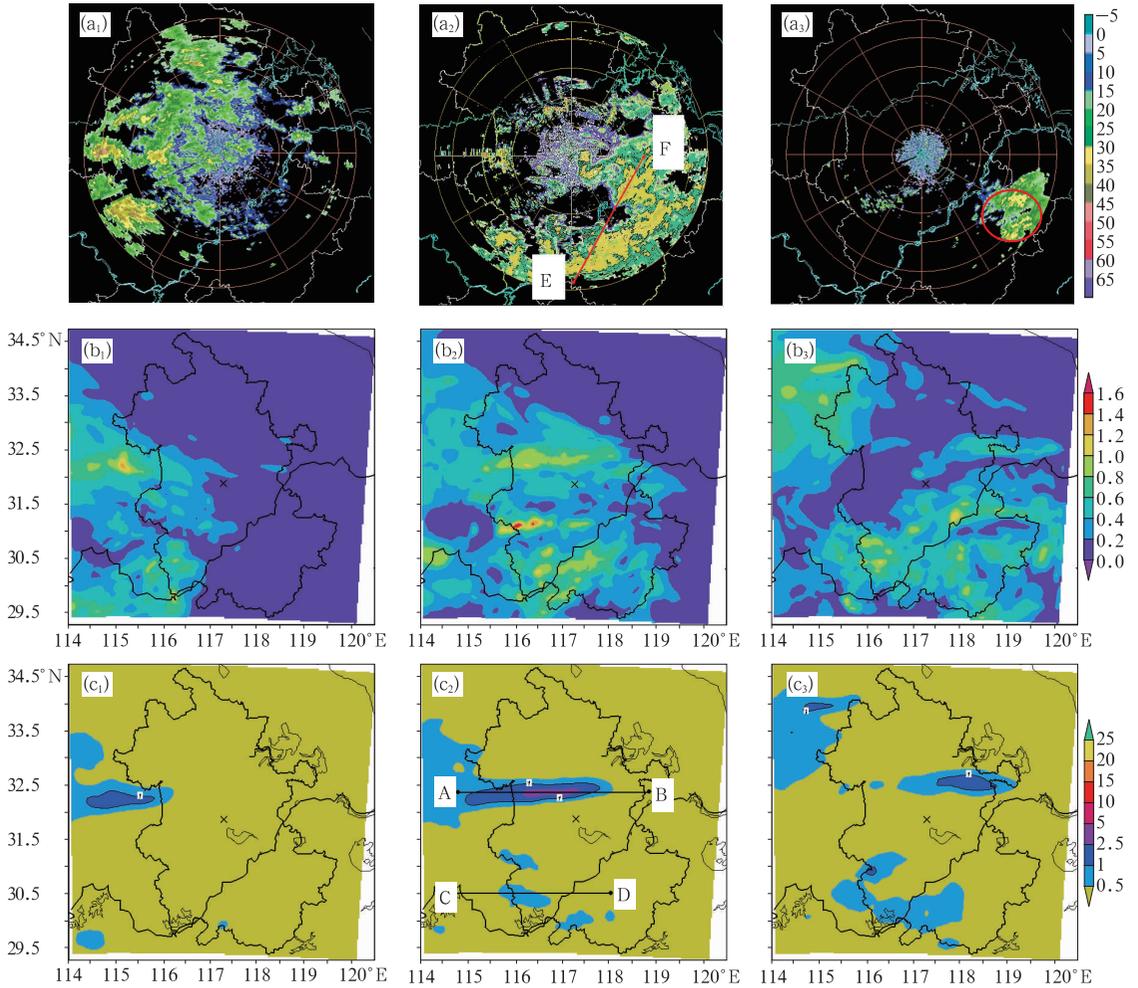


图 3 (a) 雷达回波图(单位: dBZ), (b) 模拟的垂直积分云水含量(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), (c) 逐时降水量(单位: mm)
Fig. 3 (a) radar echoes (unit: dBZ), (b) simulated VIL cloud water (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$),
(c) observed hourly rainfall (unit: mm)

图 5 和图 6 给出沿图 3 中 AB、CD 两线的水成物含量剖面图。为了看得清楚,垂直速度放大了 100 倍。图 5 中可以看出沿 AB 线的剖面图中自高到低依次为冰晶、雪、霰、云水、雨水。冰晶含量很少,最高值为 $6.5 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,雪晶含量最高值为 $0.0009 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最大云水含量为 $0.00016 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,霰含量最高值为 $9 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,雨水含量极大值为 $0.00033 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。图中 0°C 线位于 800 hPa 附近,云水大多为过冷云水,同时对应应有上升气流存在,有一定的增雨潜力。对比可见雷达回波主要代表的是雨水粒子。而沿 CD 线的剖面图 6 与 AB 线的分布相似,各种水凝物的含量比 AB 剖

面略少,云中仍然还有一定量的过冷云水,云水所在处也有上升气流存在,因此也有一定的增雨潜力。

3 基于中尺度模式的增雨潜力指标应用

前面考察了这次过程模式结果对云结构和降水过程的描述是和实况基本一致的,在此基础上探讨如何利用模式结果对适合增雨的区域进行预报。考虑到业务上需要较为直观的方式来进行预报,这里使用一个综合指标对云系的增雨潜力条件进行表征。该指标通过背景环境场的动力热力和微物理特

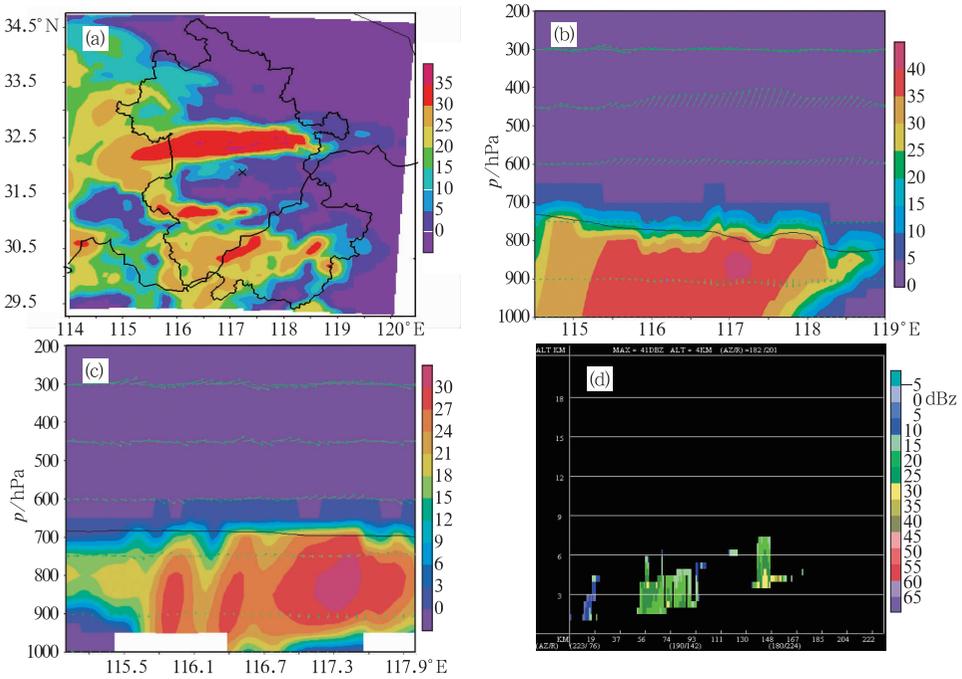


图 4 模拟 850 hPa 雷达回波 (a), 沿图 3c₂ 中 AB(b) 和 CD(c) 线剖面与实况雷达回波剖面沿图 3a₂ 中 EF 线(d) (单位: dBZ)

Fig. 4 Simulated 850 hPa radar echo distribution (a), radar echo cross sections along line AB (b) and line CD (c) in Fig. 3c, and radar echo cross section observed along line EF (d) in Fig. 3a₂ (unit: dBZ)

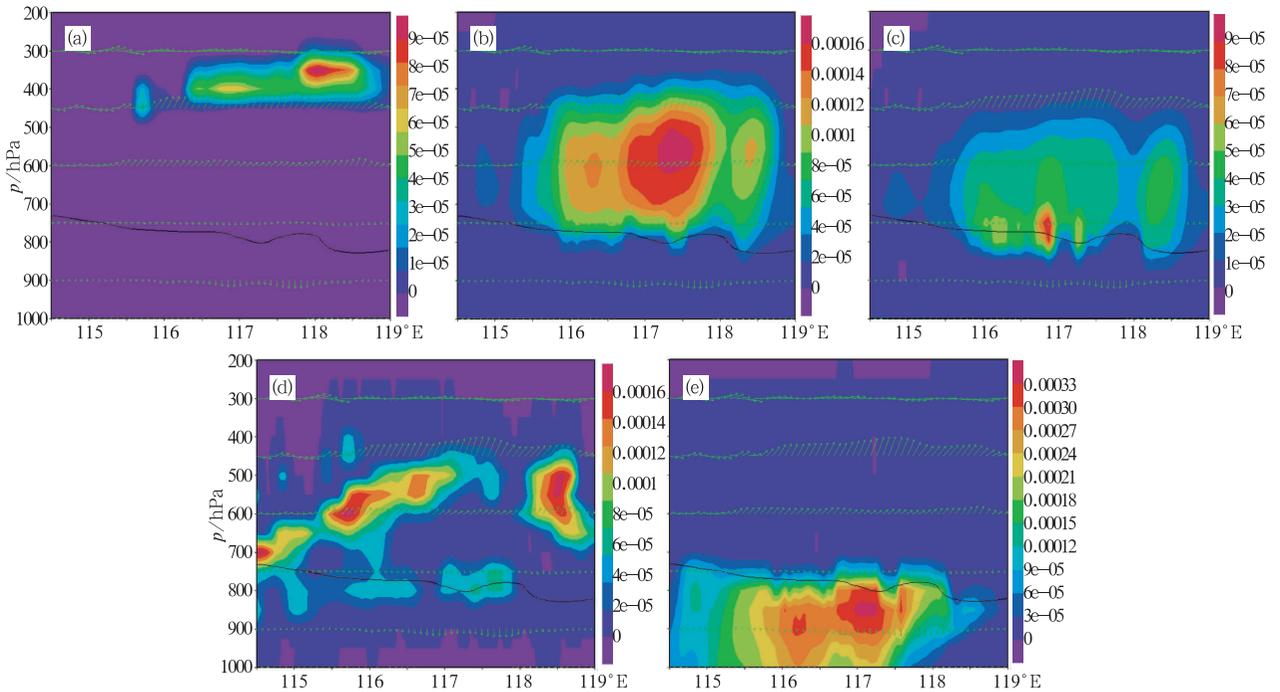


图 5 2006 年 11 月 16 日 03 时沿图 3c₂ 中 AB 两点水成物含量剖面图及风场, 图中黑线为 0 °C 线 (a) 冰晶; (b) 雪; (c) 霰; (d) 云水; (e) 雨水

Fig. 5 Cross sections of the following hydrometeors along line AB in Fig. 3c, and wind distribution, the black line is the isotherm isopleth of 0 °C (a) ice, (b) snow, (c) graupel, (d) cloud water, and (e) rain water

征指标来综合判断增雨潜力大小^[9], 由 MM5 模式产品计算的 4 个因子通过叠加法得到, 指标 $Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4$ 。

其中, Z_1 由 300 hPa、400 hPa、500 hPa 这 3 层中最大一层的 $e - E_i$ 的值确定, 根据 $e - E_i$ 将 Z_1 分 2 级:

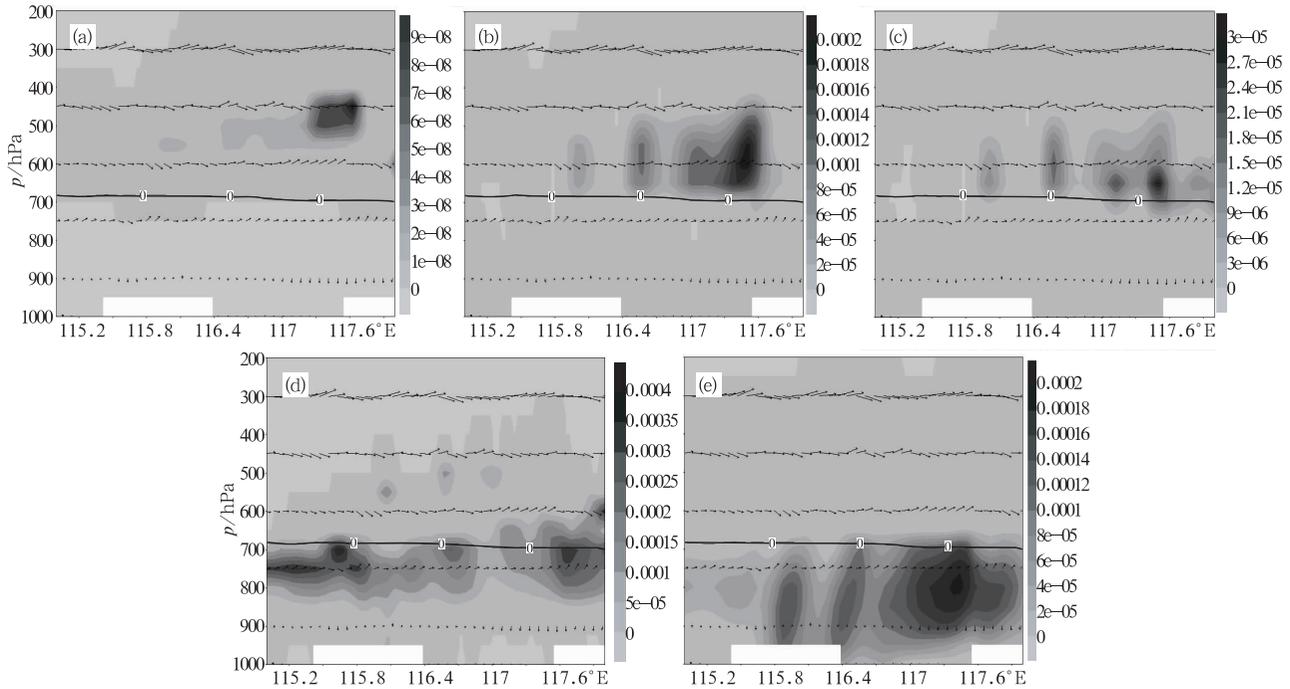


图6 2006年11月16日03时沿图3c中CD两点水成物含量剖面图及风场,图中黑线为0℃线
(a)冰晶;(b)雪;(c)霰;(d)云水;(e)雨水

Fig. 6 As in Fig. 5, but for along line CD in Fig. 3c

$$Z_1 = \begin{cases} 0 & e - E_i < 0 \\ 2 & e - E_i \geq 0 \end{cases}$$

Z_2 由 300 hPa 和 850 hPa 散度差确定,分3级:

$$Z_2 = \begin{cases} 0 & \text{散度差} < 0 \\ 1 & 5.0 \times 10^{-4} > \text{散度差} \geq 0 \\ 2 & \text{散度差} \geq 5.0 \times 10^{-4} \end{cases}$$

Z_3 由 K 指数确定,分3级:

$$Z_3 = \begin{cases} 0 & K < 0 \\ 1 & 30 > K \geq 20 \\ 2 & K \geq 30 \end{cases}$$

Z_4 根据比湿的大小分3级:

$$Z_4 = \begin{cases} 0 & \text{比湿} < 0 \\ 1 & 20 > \text{比湿} \geq 0 \\ 2 & \text{比湿} \geq 20 \end{cases}$$

这其中指标阈值根据季节的不同而不同^[9],这里用的是秋冬季节的阈值。指标分9个等级(0~8),数值随着增雨潜力的增大而增大。图7给出按照这种方法得到的增雨潜力指标在15日18时至16日03时每隔3小时一次的分布图,由图可以很直观地看到,15日18时安徽境内还没有什么增雨指数的高值出现,21时开始,西部大别山地区和西南端增雨潜力指数达到3~4级,16日00时,安徽的大部分地区增雨潜力指数达到3级以上,尤其西

南大别山、安庆一带增雨潜力指数达到5级以上,16日03时,云体向东南方向移动,安徽东南端部分地区增雨指数在5以上,同时西部还有较少范围仍有5级以上增雨指数。至16日06时(图略),只有东部小部分地区仍有5级以上指标,09时(图略)全省的增雨潜力指数都较小,过程基本结束。纵观整个过程,模式指示的作业条件较好的时段在16日00—03时,地点处于安徽中西部部分地区和南部,指标最大值达到5。

通过对比可以看出,增雨潜力时间和空间的分布和前一段分析的模拟降水时空分布是一致的:时间上,指标提示适合增雨最好的时段在00—03时,模拟的降水发生时段从00时开始,降水最大的时段在03—05时,指标可以起到预报的作用;空间上,指标提示00时的适合作业的位置位于安徽南部,03时的位置除安徽南部外还有中部部分地区也较好,而模拟的降水也是发生在上述区域。

为了进一步考察指标在这次过程中的适用性,以16日00时的指标为例进一步分析指标与云结构的关系。图8给出增雨潜力指标中包含的4个指标在16日00时的分布图。由图可见,此时安徽中部32.5°N附近以及南部30°N附近在400 hPa的冰面过饱和度为0.2以上的正值,说明此时此地水汽相对于冰面已经过饱和,有利于水汽向冰晶转化

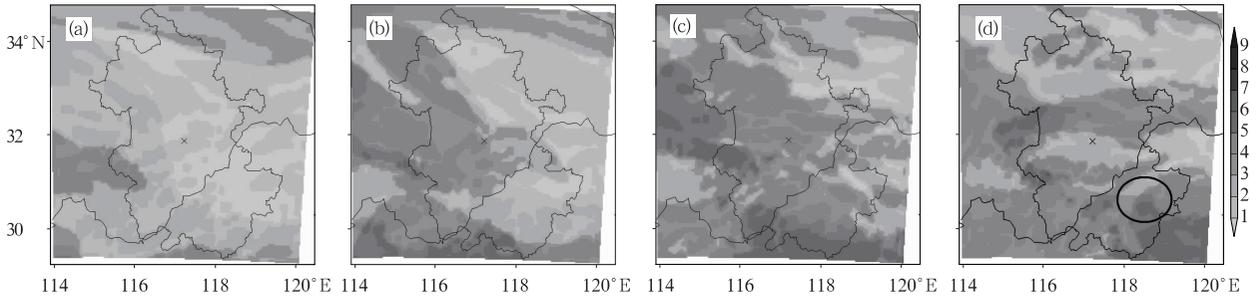


图 7 2006 年 11 月 15—16 日基于 MM5 模式的增雨潜力等级分布预测图

(a) 15 日 18:00; (b) 15 日 21:00; (c) 16 日 00:00; (d) 16 日 03:00

Fig. 7 Rainfall potential distributions according to the MM5 model predicted results at

(a) 18:00 BT 15 November 2006, (b) 21:00 BT 15 November 2006, (c) 00:00 BT 16 November 2006 and (d) 03:00 BT 16 November 2006

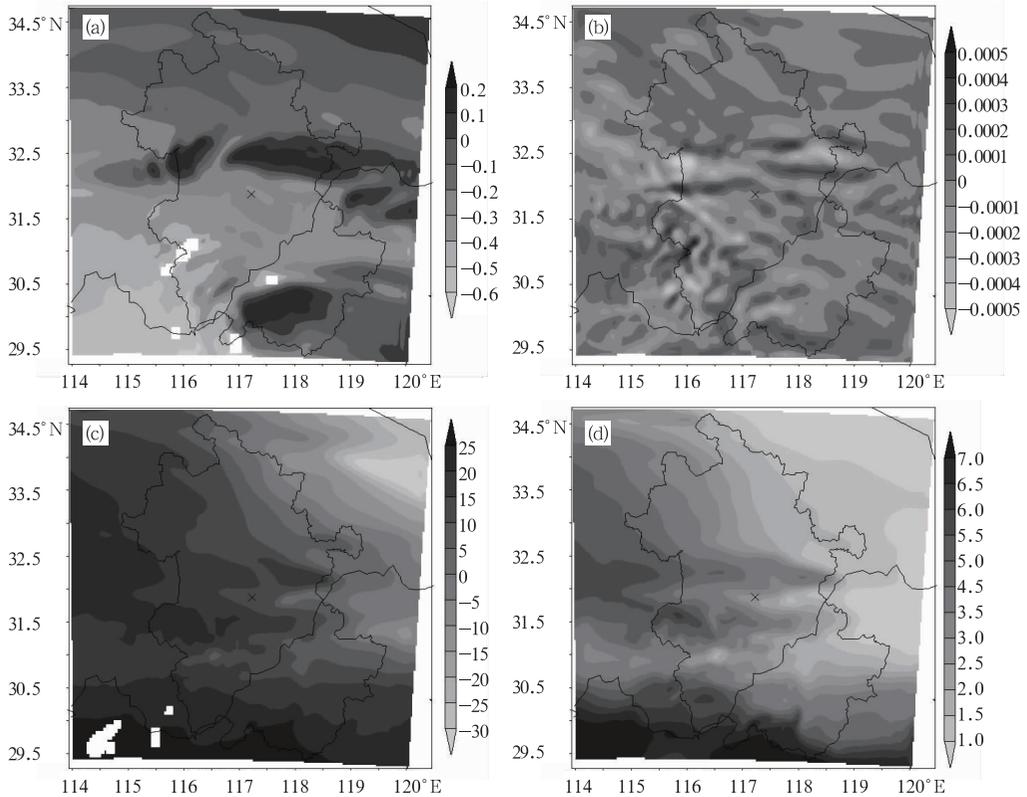


图 8 2006 年 11 月 16 日 00 时 MM5 模式各因子分布图

(a) 400 hPa 冰面过饱和度; (b) 散度差(单位: s^{-1}); (c) K 指数(单位: $^{\circ}C$); (d) 850 hPa 比湿(单位: $g \cdot kg^{-1}$)

Fig. 8 The distributions of various indexes according to MM5 model at 00:00 BT 16, November 2006

(a) ice supersaturation at 400 hPa, (b) divergence difference(s^{-1}), (c) K index ($^{\circ}C$) and (d) q at 850 hPa ($g \cdot kg^{-1}$)

过程发生,是非常有利的增雨条件;散度差的分布图显示,该时次安徽不少地区上升气流较活跃,这也是有利的作业条件;K 指数分布图则显示,此时 K 指数最强的地区分布在安徽南部地区和 $31.5^{\circ}N$ 、 $116^{\circ}E$ 附近,其最大值在 25 以上,说明这些地区的天气对流性较为活跃,有利于增雨作业;最后 850 hPa 的比湿分布图表明,低层湿度条件较好的地区位于安徽南部,最大比湿值达到 $7.5 g \cdot kg^{-1}$,因此低层

水汽条件也较好。对比图 3 到图 6 中的云系结构,可以看到模拟的云水分布区域与冰面过饱和度、K 指数、低层比湿都有较好的对应关系,云系在指标提示有增雨潜力的区域得到了发展;对比图 3 中 00 时之后的降水情况,K 指数、850 hPa 比湿对安徽南部的降水预报较好,而冰面过饱和度对安徽中部发生的降水的指示意义较之其他指标更好,散度差的区域性指示意义则相对较差。总的来说这些指标对云

系发展和降水发生都有良好的指示意义。

在这个例子中,降水发生前,安徽的皖南山区处于久旱的状态,急需开展增雨作业缓解旱情,而模式结果也提示了这一地区在 15 日夜间到 16 日凌晨有可能有适合作业的云系出现。前面的分析结果表明模式结果和实况在云系的移动趋势、云降水结构方面较为一致,但是在云系出现时间和具体位置上还存在一定差异,这种差异需要结合实况资料来订正。从卫星反演的云分类图中(图 9a~d) 主要出现了三种云体——高层云或雨层云(黄色)、卷层云(蓝色)、层积云或高积云(灰色)。这三种云体一般对应出现在不同的高度中。灰色代表低层含有水汽的层积云或高积云,蓝色代表高层的卷积云,而黄色代表中间的高层云或雨层云。其中可能引起降水的云体为黄色云系代表的高层云或雨层云,以及蓝色云系覆盖之下的云系。该图表明 16 日 00 时之前云系是自西北向东南移动的,从云系发展趋势看云系将要移动到安徽南部,对应的灰色和黄色代表的云系也是

有可能适合增雨作业。同样是卫星反演的 500 hPa 水汽分布则提示 15 日 21 时之后安徽地区形成了有利于云体发展的水汽通道,图 9e 中给出 15 日 22 时卫星反演的 500 hPa 水汽含量图,此时(31° N、118° E)附近为水汽的高值中心。进一步的作业时机判断则要依靠雷达,图 10 中给出 16 日 00 时的 0.5°仰角雷达回波、垂直积分液态含水量以及回波顶高图,由图可见此时云系位于 30.5° N、117° E 附近,结合前面时刻的图可判断此时云系将要向东南方向移动,云系中大部分位置的垂直积分液态水含量普遍在 0~1 kg·m⁻²,回波顶高在 6 km 左右,与图 3 中模拟的积分液态水含量普遍在 0~1.6 kg·m⁻²之间,云系高度在 700 hPa 以下这些云降水特征是一致的,此时模式的预报、卫星雷达的实况资料都提示皖南山区将有一次可进行增雨作业的弱降水过程。在此基础上,16 日 00 时之后在皖南山区、宣城等地开展了人工增雨作业,作业范围见图 3a₃、图 7d、图 9d 中圆圈标识。

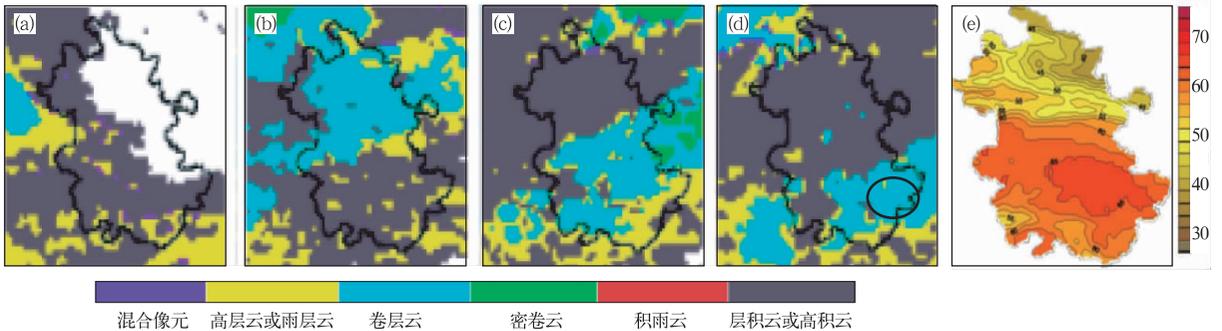


图 9 2006 年 11 月 15—16 日卫星反演云分类(a~d)和 500 hPa 水汽(e)

(a) 15 日 12:00; (b) 15 日 15:00; (c) 15 日 18:00; (d) 16 日 00:00; (e) 15 日 22:00

Fig. 9 Satellite-retrieved cloud classification maps (a~d) and 500 hPa water vapor (e) at

(a) 12:00 BT 15 November, (b) 15:00 BT 15 November, (c) 18:00 BT 15 November,

(d) 00:00 BT 16 November and (e) 22:00 BT 15 November 2006

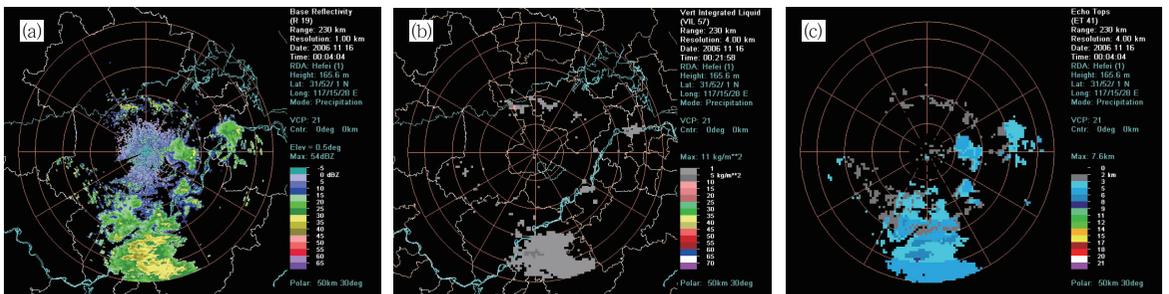


图 10 2006 年 11 月 16 日 00 时雷达回波 (a), 垂直积分液态水含量 (b), 云顶高度(c)

Fig. 10 The radar echo(a), VIL water content (b), and cloud-top height(c) observed at 00:00 BT 16 November, 2006

4 结 语

文章针对 2006 年 11 月 15—16 日安徽省南部

山区一次积层混合云降水实例,使用中尺度模式 MM5 的模式产品以及降水量、雷达卫星反演产品对这次过程的增雨潜力条件进行了分析,总结特点如下:

(1) 中尺度模式较为成功地预报了降水过程,云系中配合有上升气流的过冷云水是有利的增雨条件。模式与实况资料在总降水量、云系结构特征、云系发生发展趋势方面是基本一致的,因此将模式用于进一步的增雨潜力预报是可行的。

(2) 基于 MM5 模式背景环境场的动力热力和微物理特征指标对云系发展和降水过程具有一定的预报和指示意义。如冰面过饱和度达到 0.2 以上, K 指数达到 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 低层比湿达到 $7.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而散度差也表明了多处上升气流的存在, 这些对于这次过程都是可用于判断增雨作业的具体指标。而卫星雷达反演产品验证了云系具有和模式结果一致的结构特征, 如云系垂直积分液态水含量在 $0\sim 1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右, 回波顶高在 6 km 左右, 回波具有积层混合云特征, 这些也是对安徽秋季的降水过程可用的指标。

(3) 尽管中尺度模式在这次过程中尚不能精确地预报整个过程, 但模式对云系的发展趋势、云系特征等的预报仍有重要的指示意义, 而雷达资料可用于进一步确定作业的具体时机和位置。

云系的增雨潜力大小是一个很复杂的问题, 指标的有效性如何进行检验尚待进一步的研究。以上工作只是针对一个个例来说明数值模式产品与观测资料结合起来在增雨潜力预报和分析中的应用, 这种方法对不同的天气形势、不同的云系是否需要细化调整, 是否能根据历史资料来量化地确定增雨作业指标, 这些工作有待今后开展。

参考文献

[1] 樊志超, 高继林. 湖南特大冰冻灾害的云物理特征与人工影响

技术探讨[J]. 气象, 2009, 35(11): 84-93.

- [2] 于丽娟, 姚展予. 一次层状云飞机播云试验的云微物理特征及响应分析[J]. 气象, 2009, 35(10): 8-25.
- [3] 唐仁茂, 向玉春, 叶建元, 等. 多种探测资料在人工增雨作业效果物理检验中的应用[J]. 气象, 2009, 35(8): 70-76.
- [4] 李红斌, 何玉科, 姚展予, 等. 多普勒雷达速度场特征在人工增雨作业中的判据指标应用[J]. 气象, 2008, 34(6): 102-108.
- [5] 张连云, 冯桂利. 降水性层状云的微物理特征及人工增雨催化条件的研究[J]. 气象, 1997, 23(5): 3-7.
- [6] 王以琳, 刘文. 冷云人工增雨催化区的探空判据[J]. 气象学报, 2002, 60(1): 116-121.
- [7] 姚展予, 濮江平, 刘卫国, 等. 飞机探测云物理数据集的建立和应用[J]. 应用气象学报, 2004, 15(S1): 68-74.
- [8] 黄毅梅, 周毓荃, 刘金华, 等. 人工增雨可播区域自动选择方法研究[J]. 气象, 2008, 34(7): 108-113.
- [9] 叶建元, 徐永和, 丁建武, 等. 对流云人工增雨作业等级预报[J]. 气象, 2003, 29(4): 40-43.
- [10] 翟菁, 周毓荃, 杜秉玉. 河南省层状降水云系中尺度结构的数值模拟[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(1): 34-42.
- [11] 翟菁, 周后福, 冯妍, 等. 数值模式产品应用于安徽省可增雨区预报的研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(3): 1153-1155.
- [12] 胡雯, 黄勇, 翟菁. 中尺度模式和新一代天气雷达产品识别云降水方法[J]. 气象科技, 2007, 35(4): 470-473.
- [13] 魏慧娟, 崔新建, 杨国锋, 等. 市(地)级人工增雨决策指挥系统[J]. 气象, 2007, 33(12): 110-116.
- [14] 万蓉, 李盾. 南方层积混合云催化作业与数值模拟[J]. 气象, 1997, 23(9): 21-26.
- [15] 洪延超, 周非非. 层状云系人工增雨潜力评估研究[J]. 大气科学, 2006, 30(5): 913-926.
- [16] 李永振, 李茂伦, 李薇, 等. 北方降水性层状云人工增雨潜力区的逐步判别研究[J]. 应用气象学报, 2003, 14(4): 430.
- [17] 连志鸾, 邢开成. 层状云人工增雨宏观判据在 MICAPS 平台上的演示与应用[J]. 气象科技, 2005, 33(5): 445-500.
- [18] 万蓉, 郑国光, 王斌, 等. 利用多普勒雷达速度资料检验三维中小尺度模式流场[J]. 气象, 2009, 35(1): 3-8.