

孙晶, 史月琴, 蔡森, 等. 2015. 南方三类云系云结构预报和增雨作业条件分析. 气象, 41(11):1356-1366.

南方三类云系云结构预报和增雨作业条件分析^{*1}

孙 晶¹ 史月琴¹ 蔡 森¹ 周毓荃¹ 唐 林²

1 中国气象科学研究院, 中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081

2 湖南省人工影响天气办公室, 长沙 410118

提 要: 2013 年夏季, 我国南方出现了大范围高温干旱天气。8 月 1—22 日, 中国气象局人工影响天气中心利用人影数值模式为南方高温旱区开展云结构预报和人工增雨作业条件分析服务工作。文章简要回顾了 2013 年 8 月的旱情和天气过程, 重点对 2013 年 8 月南方三类云系的云结构预报结果和增雨作业条件进行了分析。8 月 1—22 日, 我国南方高温旱区降水过程可分为 3 种类型。1—4 日为台风外围云系降水; 5—13 日为副热带高压控制下局地对流性降水; 14—22 日为台风登陆后低压环流云系降水。人影模式对台风外围云系和低压环流云系降水的范围和强度基本预报正确, 对云系影响时段和局地对流降水位置的预报略有偏差。利用卫星反演光学厚度、实测雨量和雷达回波检验模式预报结果, 大范围云系与实况卫星反演结果比较吻合, 而且能够预报出局地对流云团, 以及与实况接近的云层性质和垂直结构。综合分析云带、过冷水、云垂直结构、降水等产品可知, 台风外围云系和低压环流云系既有暖云降水、也有冷暖混合云降水, 冷暖混合云中有最大值为 $0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 过冷水, 位于 $-10 \sim 0^\circ\text{C}$, 冰晶数浓度较小, 可能有较好的冷云催化增雨潜力; 副热带高压内部局地对流云团基本为冷暖混合云降水, 在初始发展阶段会出现最大值为 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 过冷水, 冰晶数浓度很少, 上升运动大值区位于过冷水层下方, 可能有很好的冷云催化增雨潜力。针对南方夏季积层混合云以及对流云的微物理结构和增雨条件的研究以及预报准确率还需加强和提高。

关键词: 人工影响天气, 高温干旱, 作业条件, 数值预报

中图分类号: P457, P481

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.11.005

Analysis on Cloud Structure Forecast and Seeding Conditions of 3 Types of Cloud System in South China

SUN Jing¹ SHI Yueqin¹ CAI Miao¹ ZHOU Yuquan¹ TANG Lin²

1 Weather Modification Center of CMA, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Hunan Weather Modification Office, Changsha 410118

Abstract: Wide range of high temperature and drought occurred in South China in the summer of 2013. From 1 to 22 August, Weather Modification Center of CMA carried out the work of cloud structure forecast and seeding conditions analysis using weather modification models. This paper briefly reviews drought and weather and analyzes cloud structure forecast and seeding conditions. Three types of cloud system precipitation happened during 1—22 August in the drought region. Type I is precipitation of typhoon periphery cloud system from 1 to 4 August, Type II is precipitation of local convective cloud controlled by subtropical high from 5 to 13 August, and Type III is low pressure cloud system from 14 to 22 August after typhoon landing. The precipitation forecasts of weather modification model are basically correct with observations of Types I and III, but a bit different from Type II. The forecast results are validated by the observations of satellite, radar and precipitation. The distribution of large cloud system coincides with the re-

* 中国气象科学研究院基本科研业务项目(2011Z005 和 2014R004)及公益性行业(气象)科研专项(GYHY20120625)共同资助
2014 年 7 月 30 日收稿; 2015 年 5 月 15 日收修定稿
第一作者: 孙晶, 主要从事云降水物理和人工影响天气研究. Email: sunj@cams.cma.gov.cn

retrieval result of satellite. The model can forecast the development of local convective cloud. The cloud property and vertical structure are basically consistent with radar observations. The seeding conditions are analyzed through the products of cloud band, supercooled water, vertical structure of cloud, precipitation etc. There is not only warm cloud but also mixed phase cloud of precipitation of Types I and III. The mixed phase cloud has supercooled water with the maximum of $0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and less ice crystals between 0 and -10°C , which is suitable for cold cloud seeding. In the beginning stage there is the supercooled water with maximum value $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, which is good for cold cloud seeding. A lot of work needs to do about the microphysical and seeding conditions of model forecasts for mixed phase cloud and precipitation in South China.

Key words: weather modification, high temperature and drought, seeding conditions, numerical weather prediction

引 言

我国是水资源短缺和气象灾害频发的国家,近年来受气候变化等的影响,发生严重旱灾的频率明显增加,给农业生产和人民生活等带来严重影响。人工影响天气是气象服务的重要科技手段之一。在防灾减灾和云水资源开发的迫切需求下,我国一直广泛地开展着人工增雨作业。目前我国有 30 个省(区、市)开展飞机、高炮、火箭增雨防雹作业,人工增雨作业区面积达 360 万 km^2 (郑国光等,2012)。人工增雨作业是在适当云层中播撒人工催化剂,以使更多的水汽和云水转化为降水。在实施人工增雨作业前,需要对作业实施对象——云系的宏微观特征进行预判,提前确定合适的作业区域、作业时机和作业剂量,才能科学地实施人工增雨作业。因此,利用数值模式对云结构和人工增雨作业条件进行预报和分析,为开展人工增雨外场作业提供技术支撑和指导,具有十分重要的科学意义和实用价值。

目前的区域数值模式预报产品,主要包括位势高度、温度、风、降水等要素,通过它们可以提前了解天气形势、降水等的发展演变(闫之辉等,2010),但是传统的数值预报产品不包括云的宏微观结构,无法提供人工影响天气作业关注的云顶高度、云顶温度、 0°C 层高度、过冷层厚度、云中各种水成物粒子含量等,不能满足人工影响天气作业的需求。因此有必要研发人工影响天气作业条件预报产品,开展人工影响天气模式预报业务。美国在 Wyoming 人工影响天气五年试验项目中利用 WRF 中尺度模式的实时四维资料同化预报系统(RT-FDDA)对地形云增雨(雪)作业条件预报(Lou et al,2011)。我国学

者也一直在人工影响天气数值模式的发展及其在人工影响天气业务中的应用进行着不断研究(张邢等,2013;陈小敏等,2014),中尺度可分辨云模式已经应用于云结构和人工影响天气作业条件预报和分析(Lou et al,2012)。

人工影响降水的方法按其影响降水过程的不同分为两类(李大山,2002),一类是静力催化,即影响云中的微物理过程以提高降水效率,另一类是动力催化,即影响云中动力学过程以增大云中的上升气流。静力催化又可分为冷云催化(即人工影响冰晶过程)和暖云催化(即人工影响碰并过程)。静力催化的冷云人工增雨的经典理论是催化引入的人工冰晶可以通过贝吉隆过程使过冷水转化为降水。贝吉隆过程是指:在温度低于 0°C 和过冷水滴、冰晶、水汽共存的云区,由于水面的饱和水汽压比冰面的高,当云中的水汽压处于两者饱和值之间时,水汽在冰晶上凝华而使冰晶长大,同时水滴不断蒸发。国内外开展了各类云系(地形云、层状云、对流云等)的冷云静力催化人工增雨(雪)的外场试验和数值模拟研究,在作业条件和催化方法方面取得了很多研究成果。美国在 Wyoming 地形云增雪试验项目中将温度、过冷水和风作为催化条件识别指标(Breed et al,2014)。Xue 等(2013)利用 WRF 模式分析了 AgI 催化冬季地形云过程,指出降水的增加来自水汽消耗,催化效果与自然降水效率成反比,与播撒率成正比。Guo 等(2007)和方春刚等(2009)数值模拟了 AgI 播撒对对流云和降水的影响,结果表明在最大上升气流区播撒效果最好,其次是过冷水区播撒。何晖等(2013)对北京层状云进行人工增雨数值模拟,不同催化高度和催化时间的结果表明,应选择过冷水含量比较丰富而冰雪晶含量偏少的区域进行

播撒,云系的初始阶段催化效果显著。

我国南方夏季出现干旱的主要影响系统是西太平洋副热带高压(以下简称副高),而降水的影响系统主要为台风、西风槽、副热带辐合带等(夏丽花等,2003;李玉林等,2003),云系性质主要为对流云和积层混合云(蒋年冲等,2003)。2013年夏季,我国南方出现大范围高温天气,并且降水异常偏少,出现严重的气象干旱。为缓解旱情,各地人影部门抓住有利时机进行增雨作业,中国气象局人工影响天气中心利用数值模式每日进行云结构预报和冷云催化增雨作业条件分析,为外场作业提供指导产品。本文简要回顾了2013年8月的旱情和天气过程,重点对2013年8月南方三类云系的云结构预报结果和冷云催化增雨条件进行分析。

1 天气过程及模式简介

1.1 高温干旱旱情和天气

2013年8月,副高偏西偏强,导致我国南方地区出现 35°C 以上高温天气,其特点是持续时间长、覆盖范围广、强度大、影响重(杨舒楠等,2013)。其中江淮大部、江汉、江南以及广西北部、重庆、贵州东部、四川东部 35°C 以上的高温日数普遍有 $10\sim 20$ d,最高气温普遍达 $38\sim 40^{\circ}\text{C}$,部分地区超过 40°C ,其中浙江新昌(44.1°C)和奉化(43.5°C)、湖南慈利(43.2°C)、安徽泾县(42.7°C)等超过历史极值。同时,我国南方地区降水异常偏少,出现严重的气象干旱。8月1日旱情蔓延,强度加大;8月13日,旱情最为严重(图1a),贵州、湖南、重庆南部、江西西部等地达到重旱,其中贵州和湖南大部分地区达到特旱。

8月1—22日,我国南方高温旱区降水过程可分为3个阶段。如图1b~1d所示,8月1—4日,副高西伸脊点位于 110°E 附近,脊线位于 27.5°N 附近,5880 gpm等位势高度线控制我国江南地区,8月2日19:30强热带风暴飞燕在海南文昌龙楼镇登陆,受其外围云系影响,2—4日南方高温旱区的贵州、重庆等地产生降水,过程累计雨量为 $10\sim 50$ mm;8月5—13日,副高西伸脊点位于 107°E 附近,5880 gpm等位势高度线控制范围扩大,南方高温旱区炎热少雨,仅零散地区出现局部对流性降水天气;14—22日,环流形势有所调整,副高明显北

抬,脊线位于 35°N 附近,南方高温旱区受低压系统控制,14日15:50强台风尤特在广东省阳江市阳西县登陆,22日02:40台风潭美在福建省福清市沿海登陆,受这2个低压系统影响,14—22日南方高温旱区出现大范围强降水,累计雨量为 $50\sim 300$ mm,旱情得到缓解。

1.2 模式简介

人工影响天气作业条件预报主要针对云的宏观结构进行预报,对于复杂的云微物理特性,需要模式采用详细的微物理方案对其进行描述。CAMS复杂微物理方案是由中国气象科学研究院开发(Hu,2005;楼小凤,2002)的一套准隐式格式的混合相双参数雪晶方案。该方案包括11个云物理预报变量,分别为水汽、云水的比质量(Q_v, Q_c),雨水、冰晶、雪和霰的比质量和数浓度($Q_r, Q_i, Q_s, Q_g; N_r, N_i, N_s, N_g$),考虑了31种云物理过程。该方案已经与MM5、GRAPES、WRF中尺度模式动力框架耦合(孙晶等,2008;Gao et al,2011),并用于降水的云物理机制和人影作业条件分析研究(史月琴等2008a;2008b;孙晶等,2011)。

利用耦合CAMS复杂微物理方案的MM5中尺度模式对2013年8月南方高温旱区进行云结构预报和增雨作业条件分析。模式水平分辨率为 15 km,预报区域为($23^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 、 $103^{\circ}\sim 123.5^{\circ}\text{E}$)。采用全球模式T213每日08时(北京时,下同)的预报资料作为初始场和侧边界条件,启动模式当日08时的预报,预报时效48 h。对流参数化方案采用KF方案。预报产品主要包括云顶温度、云顶高度、垂直累积总水成物(云带)、垂直累积过冷水、各层水成物等,通过降水、云的水平结构和垂直结构等分布和演变,来分析增雨条件。利用当日14时卫星观测云带分布检验模式预报云场后,分析第2日08时至第3日08时的云结构和增雨条件。

2 台风外围云系

2.1 云结构预报和作业条件分析

2013年8月3日,受强热带风暴飞燕外围云系影响,贵州、重庆等旱区迎来降水过程。利用8月2日08时起报的预报产品,对3日云结构和作业条件进行分析。模拟的云带用模式计算的云水、雨水、冰

晶、雪和霰含水量总和的垂直累积量代表,卫星反演的光学厚度是指在整条路径上云消光的总和。首先利用 2 日 14 时的卫星反演产品对模式预报云带进行检验(图 2),模式预报的主云区呈南北走向分布于重庆至贵州一线,与反演产品相比云带略显松散,但位置基本一致。实况显示 2 日 19:30“飞燕”在海南省文昌龙楼镇沿海登陆,之后系统继续向西北方

向移动(图略)。模式预报的云带结果显示,8 月 3 日 08 时至 4 日 08 时,贵州大部、湖南西部有台风外围云系发展,自东南向西北方向移动,贵州南部云系于 3 日 19 时开始加强,垂直累积总水成物含量在 5 mm 以上,并且含有 0.1 mm 以上的过冷水(图 3a)。模式预报的降水显示,3 日 08 时至 4 日 08 时贵州大部均有降水,南部地区有大雨(图 3b)。为进

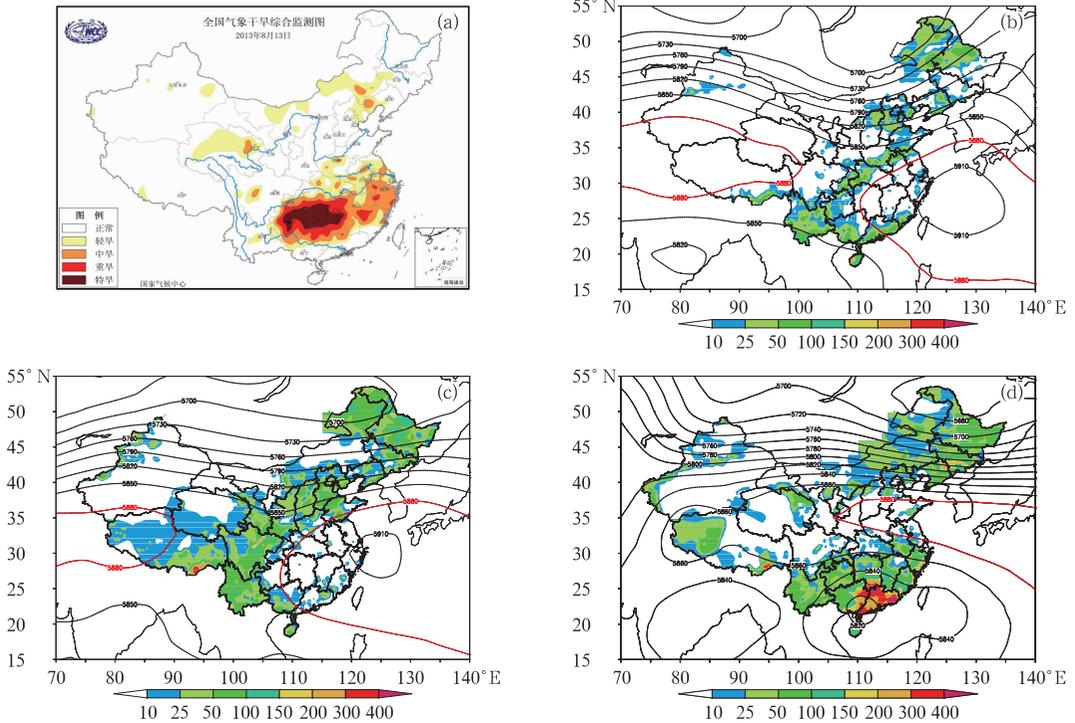


图 1 2013 年 8 月 13 日全国气象干旱综合监测图(a,引自国家气候中心);1—4 日(b)、5—13 日(c)和 14—22 日(d)的实测累积降水量(阴影,单位:mm)和 500 hPa 时间平均位势高度场

Fig.1 Meteorological drought monitoring on 13 August 2013 (a, from National Climate Centre), accumulated observed rainfall (shaded area; unit: mm) and 500 hPa temporal averaged geopotential height on 1—4 August (b), 5—13 August (c), and 14—22 August (d) 2013

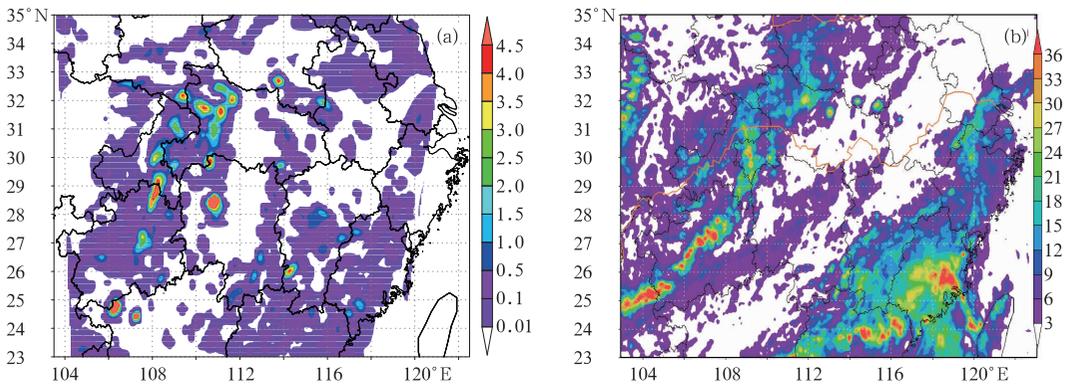


图 2 2013 年 8 月 2 日 14 时模式预报的云带(a,单位:mm)和卫星反演光学厚度(b)

Fig. 2 Model predicted cloud band (a, unit: mm) and satellite retrieval optical thickness (b) at 14:00 BT 2 August 2013

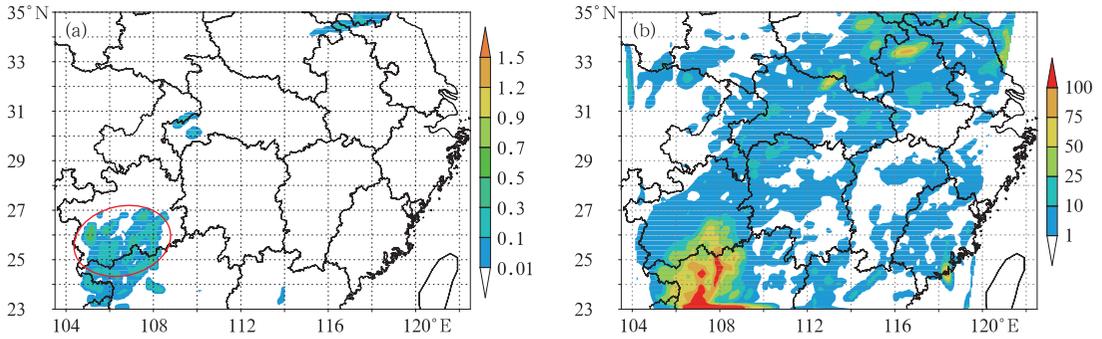


图3 2013年8月4日05时模式预报典型时刻垂直累积过冷水和增雨催化潜力区(红圈)分布(a,单位:mm)和模式预报8月3日08时至4日08时累积降水(b,单位:mm)

Fig. 3 Vertical integration of predicted supercooled water (shaded area) and potential area of artificial precipitation enhancement (red circle) at 05:00 BT 4 August 2013 (a, unit: mm) and predicted accumulated rainfall from 08:00 BT 3 to 08:00 BT 4 August 2013 (b, unit: mm)

一步分析云垂直结构,沿贵州南部 26.0°N 做水成物垂直剖面图(图4),贵州南部地区($106^{\circ}\sim 108^{\circ}\text{E}$)为冷暖混合云降水, 0°C 高度位于5000 m,云顶高度大于10 km;冰晶数浓度大值区位于300 hPa以上,最大达 $200\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$,高层冰晶尚未下落以致300 hPa以下冰晶数目减少;雪和霰主要分布在冷区的550 hPa以上,在 0°C 高度以下的暖区存在尚未融化的雪和霰;在暖区分布大量的云水和雨水,云水含量最大达到 $1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,在冷区分布着过冷水;过冷水主要位于 $0\sim -10^{\circ}\text{C}$ 层(海拔高度5000~7000 m),最大值为 $0.3\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,并且该层冰晶数浓度非常少,可能具有冷云催化增雨潜力。因此,通过分析得出,8月3日08时至4日08时,贵州地区

最有可能的冷云催化增雨潜力区分布如图3a中红圈范围所示。

2.2 预报结果检验

为检验模式对8月3—4日台风外围云系过程预报效果,下面分析实况降水和雷达回波结构。8月3日08时至4日08时高温旱区实况降水(图5a)主要分布于贵州、湖南北部、湖北、安徽至江苏一带,降水量为1~25 mm,模式预报雨区(图3b)范围比实况偏大,贵州东南部降水量级比实况偏大。贵州兴义雷达观测的回波显示(图5b),3日10时至4日05时贵州省西南部有大范围的积层混合性降水回波自东南向西北方向移动,回波最强为35 dBz,回波

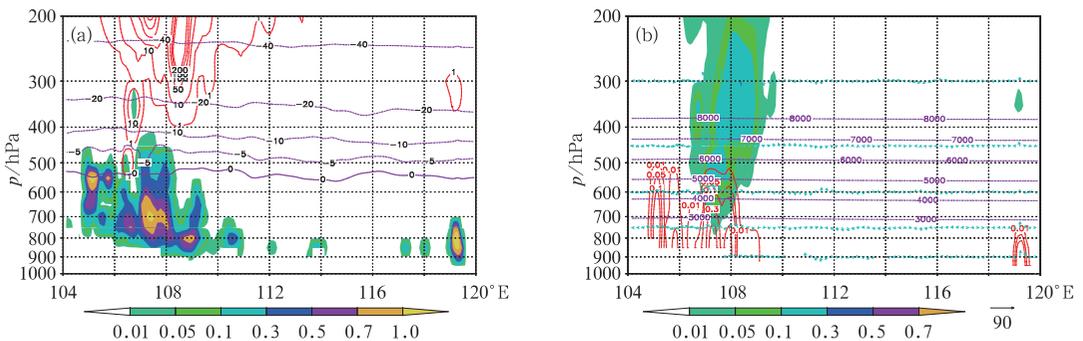


图4 2013年8月4日05时沿 26.0°N 东西向水成物垂直剖面

(a) 云水含量(阴影,单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、冰晶数浓度(红色等值线,单位: $\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$)和等温线(紫色等值线,单位: $^{\circ}\text{C}$),
(b) 雪+霰含量(阴影,单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、雨(红色等值线,单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和等高线(紫色等值线,单位:m)

Fig. 4 Vertical cross section of predicted hydrometers along 26.0°N at 05:00 BT 4 August 2013

(a) amount of cloud water (shaded area, unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), number concentration of ice (red contour, unit: L^{-1}), temperature (purple contour, unit: $^{\circ}\text{C}$), (b) amount of snow and graupel (shaded area, unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), rainwater (red contour, unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), height (purple contour, unit: m)

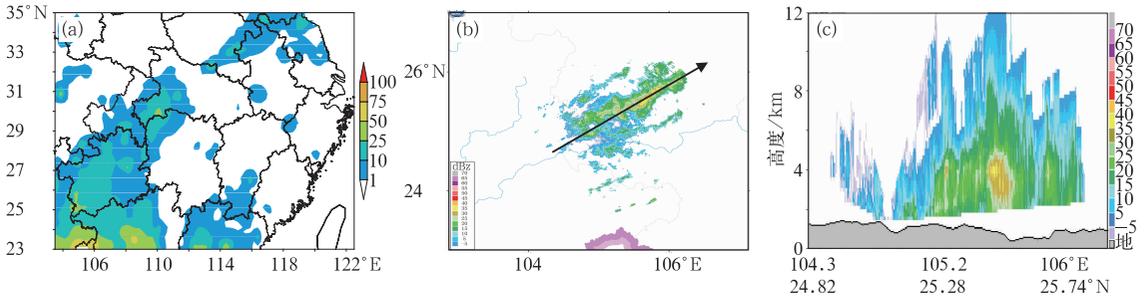


图 5 2013 年 8 月 3 日 08 时至 4 日 08 时实况累积降水(a,单位:mm)和 3 日 20:03 贵州兴义雷达组合反射率(b)及沿箭头垂直剖面(c)

Fig. 5 Observed accumulated rainfall from 08:00 BT 3 to 08:00 BT 4 August (a, unit: mm), radar composite reflectivity (b), and vertical cross section along vector in Fig. 5b (c) at 20:03 BT 3 August 2013 at Xingyi, Guizhou

顶高达到 10 km 以上(图 5c),对比 2.1 节模式分析部分,模式预报的云带位置、移动趋势、云发展高度与实况基本一致,但预报的云系影响时段比实况偏晚 6 h。

3 副高控制下局地对流云团

3.1 云结构预报和作业条件分析

8 月 5—13 日,副高控制范围扩大,南方高温旱区炎热少雨,仅零散地区出现局部对流性降水天气,此时需抓住有利时机进行人工增雨。利用 8 月 9 日 08 时起报的预报产品,对 10 日云结构和作业条件进行分析。首先利用 9 日 14 时的卫星反演产品对模式预报云带进行检验(图 6),模式预报高温旱区内的云区主要分为两类,一类呈西南—东北走向分布于重庆至河南南部一线,云层含水量不大,另一类为分散对流云团分布于湖南、江西、福建等地,两类

云的位置与反演产品相比基本吻合。云带预报结果显示(图 7a),8 月 10 日 08 时至 11 日 08 时,贵州西南部、重庆北部、湖北西部、湖南南部、江西大部、江苏中部和南部、浙江西南部局地有分散云团覆盖。其中,10 日 20 时至 11 日 06 时,贵州西南部有对流云团发展,水平尺度小于 100 km,自南向北移动;10 日 12 时至 11 日 05 时,江苏中部地区先后有 2 个对流云团自西南向东北方向移动发展;10 日 11 时至 11 日 00 时,江西中部和南部地区有多个局地对流云团发展。旱区贵州西南部、江西南部、江苏中部局地有丰沛的过冷水。模式预报的降水显示,10 日 08 时至 11 日 08 时江苏中部、江西南部、贵州西南部等有较为分散的局地降水出现(图 7b)。为了分析云垂直结构,以江西南部对流云团为例,沿 26.5°N 做水成物垂直剖面图,江西西南部地区(113.5°~114.5°E)在 10 日 11—18 时有对流云发展,13 时对流云正处于发展阶段(图 8),为暖云过程启动降水,云顶高 8 km,由云水和雨水构成,云水含量最大达

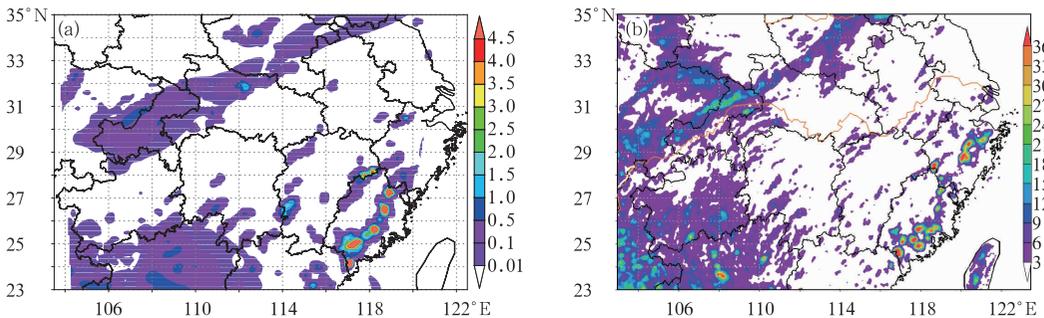


图 6 2013 年 8 月 9 日 14 时模式预报的云带(a,单位:mm)和卫星反演光学厚度(b)

Fig. 6 Model predicted cloud band (a, unit: mm) and satellite retrieval optical thickness (b) at 14:00 BT 9 August 2013

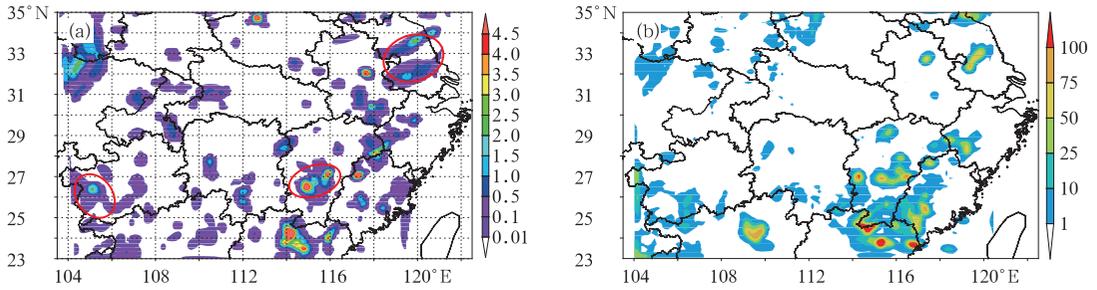


图7 2013年8月10日20时模式预报典型时刻云带和增雨催化潜力区(红色圈)分布(a,单位:mm)和模式预报8月10日08时至11日08时累积降水(b,单位:mm)

Fig. 7 Vertical integration of predicted cloud band (shaded area) and potential area of artificial precipitation enhancement at 20:00 BT 10 August 2013 (a, unit: mm) and predicted accumulated rainfall from 08:00 BT 10 to 08:00 BT 11 August 2013 (b, unit: mm)

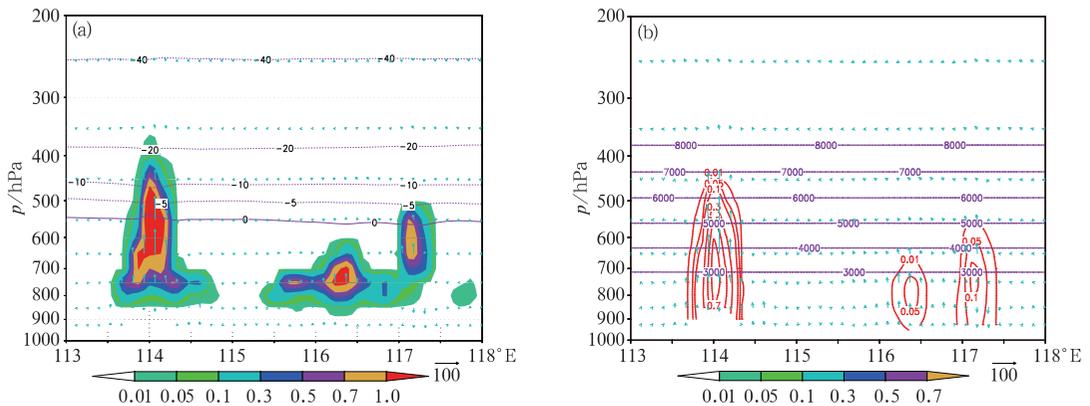


图8 同图4,但为2013年8月10日13时沿26.5°N东西向水成物垂直剖面
Fig. 8 Same as Fig. 4, but for vertical cross section of predicted hydrometers along 26.5°N at 13:00 BT 10 August 2013

到 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在冷区 $0 \sim -20^\circ\text{C}$ 层(海拔高度 5000 ~ 8200 m)分布着丰沛的过冷水, 最大值为 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 上升运动大值区位于 4000 ~ 6000 m, 最大达 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 14 时后冰相粒子发展, 转为冷暖混合云降水, 云顶抬升至 9 km(图略); 16 时后减弱至 18 时消亡。从对流云结构和演变过程来看, 在初始发展阶段(12—14 时), 云中富含丰富的过冷水, 冰晶数浓度很少, 上升运动大值区位于过冷水层下方, 可能具有很好的冷云催化增雨潜力。因此, 通过分析得出, 8 月 10 日 08 时至 11 日 08 时, 最有可能的冷云催化增雨潜力区分布如图 7 中红圈范围所示。

3.2 预报结果检验

为检验模式对 8 月 10—11 日副高控制下局地对流性降水过程预报效果, 下面分析实况降水和雷达回波结构。8 月 10 日 08 时至 11 日 08 时高温旱区实况降水(图 9a)主要分布于江西、贵州、安徽、江苏的部分地区, 降水量为 5 ~ 50 mm, 模式比较好地

预报出了副高内部分散性局地对流降水特征(图 8b), 准确预报了江西地区强降水的位置和量级。江西赣州雷达观测的回波显示(图 9b), 江西南部地区在 13—20 时有块状对流性回波发展, 自东向西移动, 回波最强达 50 dBz 以上, 回波顶高可达 10 km(图 9c), 初生回波单体尺度在 20 km 左右, 回波通过合并形成 200 km 的对流回波带, 对比 3.1 节模式分析部分, 模式预报 10 日 11 时至 11 日 00 时江西中部和南部地区有多个局地对流云团发展, 云顶高度达 9 km 以上, 模式预报的云系性质、发展高度、移动方向与实况基本吻合, 但模式预报的对流云尺度在 50 km 以上, 比实况偏大。

4 台风登陆后低压环流云系

4.1 云结构预报和作业条件分析

2013 年 8 月 18 日, 受强台风“尤特”登陆后的

低压环流云系影响,高温旱区迎来明显的降水过程。利用 8 月 17 日 08 时起报的预报产品,对 18 日作业条件进行预报。首先利用 17 日 14 时的中国气象局人工影响天气中心卫星反演产品对模式预报云带进行检验(图 10),模式预报的主云区位于贵州、广西、湖南交界附近,与反演产品相比基本接近,并且模式很好地预报出了安徽与湖北交界处的小云团。云带预报结果显示(图 11a),8 月 18 日 08 时至 19 日 08 时,重庆、湖北、河南、安徽、江苏等局地有分散云团覆盖,贵州、湖南、江西、广西、福建等地有大范围云系覆盖,稳定维持,云带中含有多个含水量大值中心,自东向西移动。旱区重庆南部、贵州大部、湖南大部、江西大部、广西北部过冷水含量较多;湖北东北部、河南南部、安徽北部、江苏北部有分散性过冷水。模式预报的降水显示,18 日 08 时至 19 日 08 时旱区内存在两条雨带,一条呈西南—东北走向位于湖北北部、安徽北部至江苏北部,一条东西走向位

于贵州、湖南以及江西南部地区(图 11b)。为了分析云垂直结构,分别沿贵州、湖南中部(26.5°N)和安徽、江苏北部(34°N)做水成物垂直剖面图。图 12 显示,贵州中部、湖南中部地区(108°~112°E)既有暖云降水(108°E 附近),也有冷暖混合云降水(110°E 附近);其中,冷暖混合云(110°E 附近)垂直结构为:0℃层高度位于 5000 m,云顶高度约 7000 m;冷区存在少量的雪和霰,存在一定过冷水,含量在 0.1 g·kg⁻¹ 以上,主要位于 0~-10℃层(海拔高度 5200~7000 m),缺乏冰晶粒子,可能具有很好的冷云催化增雨潜力。图 13 显示,安徽北部、江苏北部地区主要为冷暖混合云降水,过冷水含量较多,约 0.3 g·kg⁻¹,主要位于 0~-15℃层(海拔高度 5500~7500 m),冰晶数浓度较少,可能具有一定的增雨潜力。因此,通过分析得出,8 月 18 日 08 时至 19 日 08 时最有可能的冷云催化增雨潜力区分布如图 11a 中红圈范围所示。

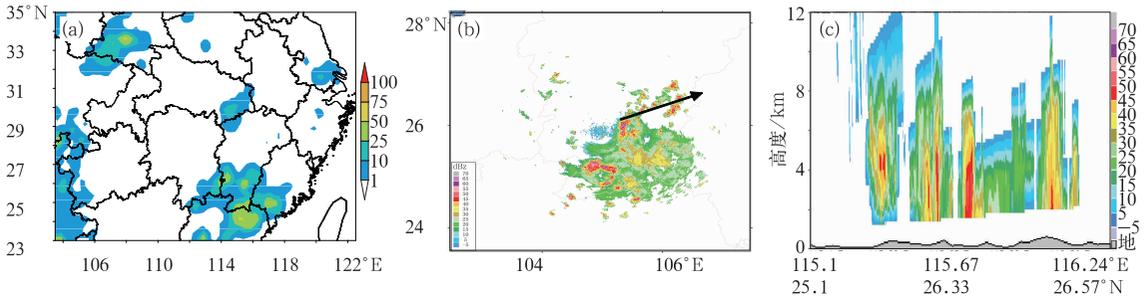


图 9 2013 年 8 月 10 日 08 时至 11 日 08 时实况累积降水(a,单位:mm)和 10 日 16:11 江西赣州雷达组合反射率(b)及沿箭头垂直剖面(c)

Fig. 9 Observed accumulated rainfall from 08:00 BT 10 to 08:00 BT 11 August (a, unit: mm) and radar composite reflectivity (b) and vertical cross section along vector in Fig. 9b (c) at 16:11 BT 10 August 2013 in Ganzhou, Jiangxi

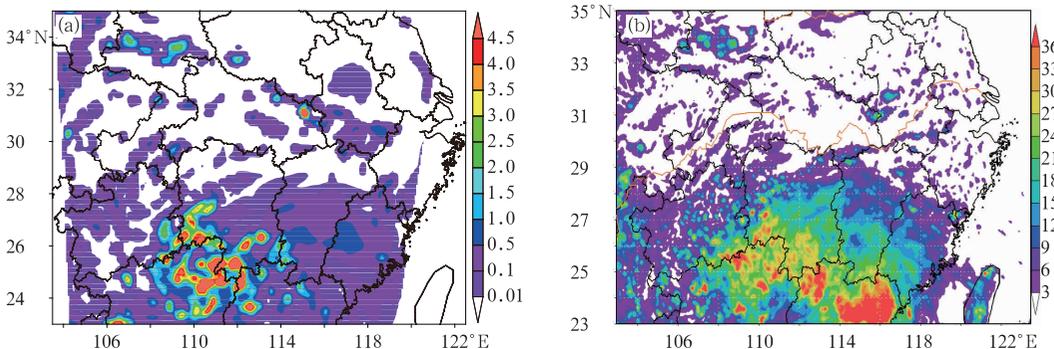


图 10 2013 年 8 月 17 日 14 时模式预报的云带(a,单位:mm)和卫星反演光学厚度(b)

Fig. 10 Model predicted cloud band (a, unit: mm) and satellite retrieval optical thickness (b) at 14 BT 17 August 2013

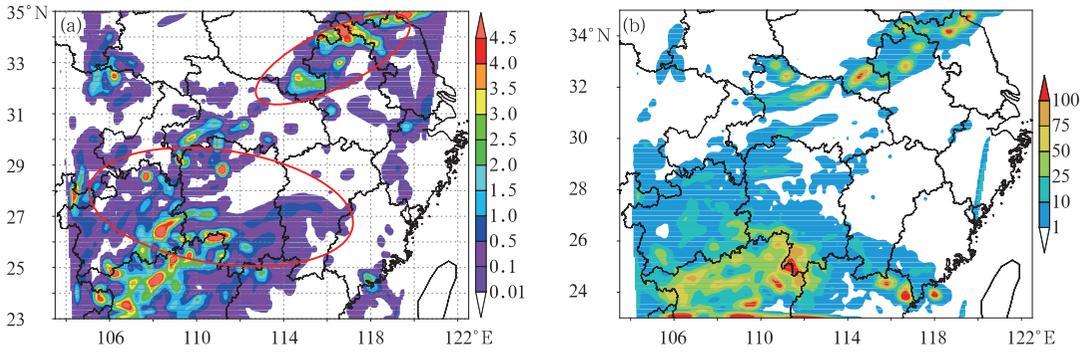


图 11 2013 年 8 月 19 日 04 时模式预报典型时刻云带和增雨催化潜力区(红色圈)分布(a,单位:mm)和模式预报 8 月 18 日 08 时至 19 日 08 时累积降水(b,单位:mm)

Fig. 11 Vertical integration of predicted cloud band (shaded area) and potential area of artificial precipitation enhancement (red circles) at 04:00 BT 19 August 2013 (a, unit: mm) and predicted accumulated rainfall from 08:00 BT 18 to 08:00 BT 19 August 2013 (b, unit: mm)

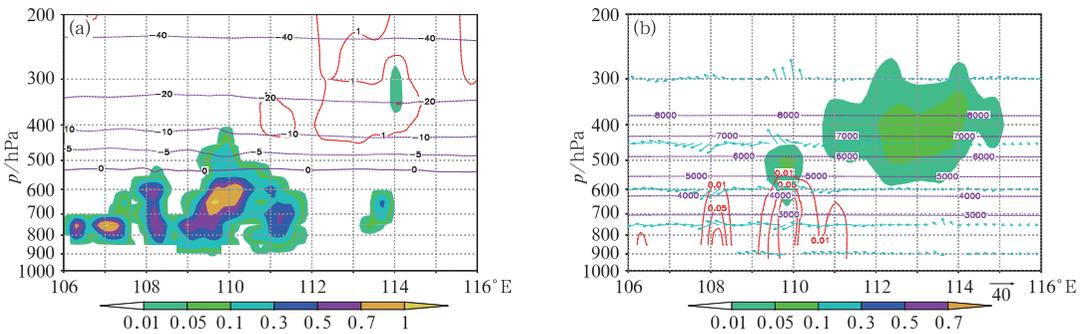


图 12 同图 4, 但为 2013 年 8 月 19 日 05 时沿 26.5°N 东西向水成物垂直剖面
Fig. 12 Same as Fig. 4, but for vertical cross section of predicted hydrometers along 26.5°N at 05:00 BT 19 August 2013

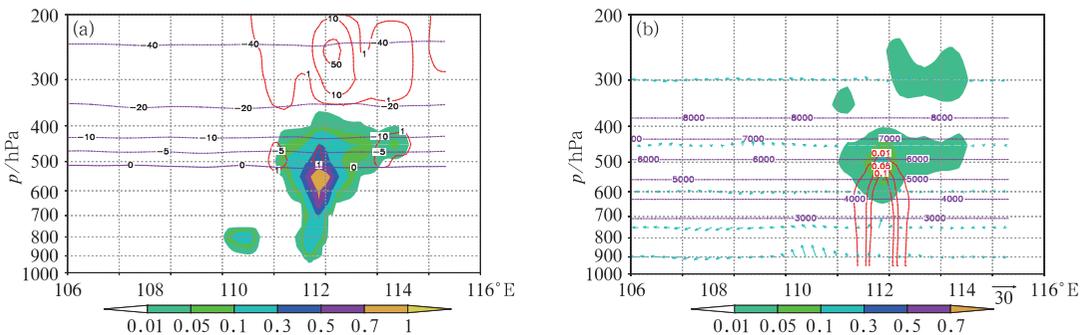


图 13 同图 4, 但为 2013 年 8 月 18 日 16 时沿 34.0°N 东西向水成物垂直剖面
Fig. 13 Same as Fig. 4, but for vertical cross section of predicted hydrometers along 34.0°N at 16:00 BT 18 August 2013

4.2 预报结果检验

为检验模式对 8 月 18—19 日台风登陆后低压环流云系降水过程预报效果, 下面分析实况降水和雷达回波结构。8 月 18 日 08 时至 19 日 08 时高温

旱区实况降水(图 14a)主要分布于贵州大部、湖南大部、江西南部、湖北中部和安徽北部地区, 降水量在 10~50 mm, 模式预报雨量(图 11b)略偏大, 分布范围与实况基本吻合。贵州遵义雷达回波显示(图 14b), 18 日 12—20 时有分散性絮状回波自东南

向西北方向移动影响贵州大部地区,回波强度在 35 dBz 左右,回波顶高在 6~8 km(图 14c),回波主要位于 5 km 高度零度层以下的暖区,对比 4.1 节模式分析部分,模式预报贵州地区有大范围云系自东向西移动,云顶高度 7 km,暖云含量较多,可见模式预报云系性质、影响时段、云顶高度等与实况接近;而位于北部雨带的江苏南京雷达回波显示,8 月 18 日 13 时,江苏北部有块状对流回波发展,初生回波水平尺度约 30 km,15 时对流回波合并成中尺度对

流回波带(图 14d),回波强度在 50 dBz,垂直结构显示(图 14e),回波带长达 200 km,回波顶高在 14 km 以上,回波带上有多个处于不同发展阶段的回波单体,20 时对流回波带减弱消散。对比 4.1 节模式分析部分,模式比较好地预报出了江苏北部对流性降水的特征(图 11),预报云顶高度在 12 km 以上,与实况接近,不足之处在于 15 km 的模拟分辨率无法细致刻画对流回波的多单体结构特征。

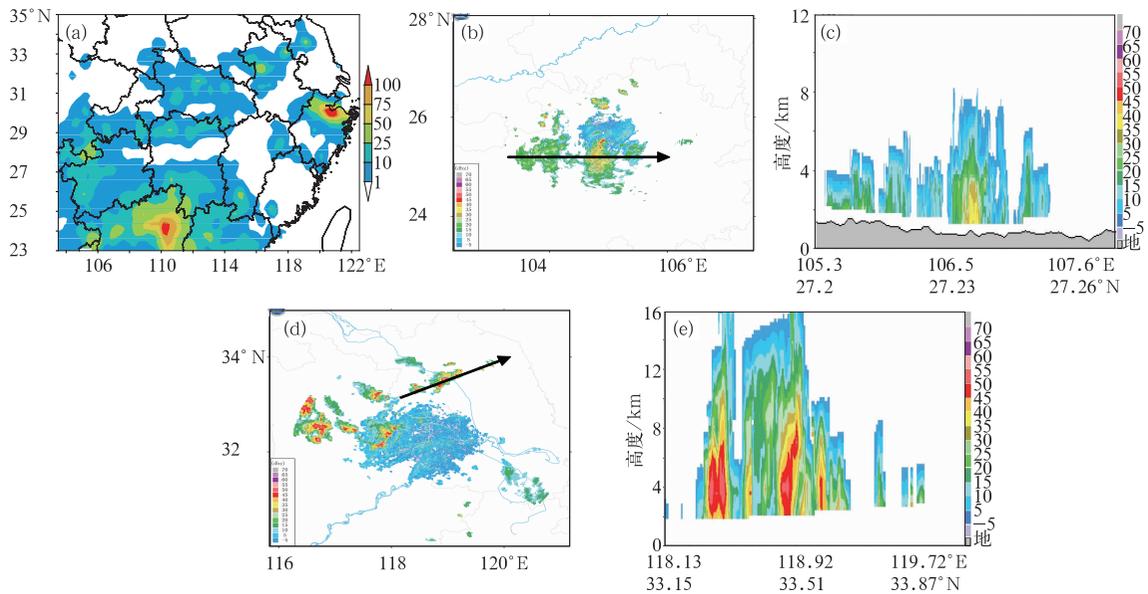


图 14 2014 年 8 月 18 日 08 时至 19 日 08 时实况累积降水(a,单位:mm),8 月 18 日 16 时贵州遵义雷达组合反射率(b)及沿箭头垂直剖面(c),8 月 18 日 15:05 江苏南京雷达组合反射率(d)及沿箭头垂直剖面(e)

Fig. 14 Observed accumulated rainfall from 08:00 BT 18 August to 08:00 BT 19 August (a, unit: mm), radar composite reflectivity (b) and vertical cross section along vector in Fig. 14b (c) at 16:00 BT 18 August at Zunyi, Guizhou, and radar composite reflectivity (d) and vertical cross section along vector in Fig. 14d (e) at 15:05 BT 18 August 2013 in Nanjing, Jiangsu

5 结论和讨论

2013 年夏季,我国南方出现大范围高温天气和严重的气象干旱。为缓解旱情,各地人影部门抓住有利时机进行增雨作业。8 月 1—22 日,中国气象局人工影响天气中心利用人影数值模式每日开展云结构预报和增雨作业条件分析服务工作,通过云带、过冷水、云垂直结构、降水等产品,分析冷云催化增雨作业条件,为外场作业提供指导产品。本文简要回顾了 2013 年 8 月的旱情和天气过程,重点对

2013 年 8 月南方三类云系的云结构预报结果和冷云催化增雨作业条件进行了分析。

8 月 1—22 日,我国南方高温旱区降水过程可分为 3 个阶段和 3 种类型。1—4 日台风外围云系降水;5—13 日,副高控制下局地对流性降水;14—22 日,台风登陆后低压环流云系降水。人影模式对台风外围云系和低压环流云系降水的范围和强度基本预报正确,对贵州省台风外围云系降水时间的预报比实况偏晚 6 h,对局地对流降水位置的预报略有偏差。利用卫星反演光学厚度检验模式预报的云带,大范围云系与实况卫星反演结果比较吻合,而且

能够预报出局地对流云团。模式能够比较好地预报出云系是否为积层混合云或对流云等云系性质,并且云顶高度等云层垂直结构与实况也基本吻合,但不能完全反映出尺度较小的对流云单体细致特征。通过综合分析三类云系的云带、过冷水、云垂直结构、降水等产品可知,台风外围云系和低压环流云系既有暖云降水、也有冷暖混合云降水,冷暖混合云中有最大值为 $0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的过冷水,位于 $-10 \sim 0^\circ\text{C}$,冰晶数浓度较少,可能具有较好的冷云催化增雨潜力;副高内部局地对流云团基本为冷暖混合云降水,在初始发展阶段会出现最大值为 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 过冷水,冰晶数浓度很少,上升运动大值区位于过冷水层下方,可能具有很好的冷云催化增雨潜力。

以往对人工增雨条件的分析研究大多针对北方层状云,而南方夏季的降水类型一般为积层混合云以及对流云,针对此类型云的微物理结构和增雨条件的研究还需加强。对于数值预报模式而言,针对南方非均匀性云和降水的预报准确率有待进一步提高,尤其是局地对流性降水,15 km 的模式分辨率较粗,模式同时采用对流参数化方案和云微物理方案,有时会使云微物理方案模拟降水比例偏少,影响云场的预报,这需要模式的时空分辨率、物理过程以及初始场等方面进行改进和完善。人影作业条件预报产品有助于外场作业方案设计,同时在临近作业时,需要利用实时雷达、卫星、飞机等监测数据对模式分析的作业潜力区进行检验和订正,将模式预报与实际作业进行有效结合,寻找最佳的增雨潜力区。

参考文献

陈小敏,邹倩,廖向花. 2014. 两次飞机增雨作业过程数值模拟分析. 气象, 40(3): 313-326.

方春刚,郭学良,王盘兴. 2009. 碘化银播撒对云和降水影响的中尺度数值模拟研究. 大气科学, 33(3): 621-633.

何晖,高茜,李宏宇. 2013. 北京层状云人工增雨数值模拟试验和机理研究. 大气科学, 37(4): 905-922.

蒋年冲,吴必文,袁野,等. 2003. 江淮地区对流云人工增雨技术研究的可行性分析. 应用气象学报, 14(s): 151-157.

李大山. 2002. 人工影响天气现状与展望. 北京: 气象出版社, 586.

李玉林,杨梅,曾光平,等. 2003. 江西干旱期间人工增雨天气条件与潜力区分析. 应用气象学报, 14(s): 170-179.

楼小凤. 2002. MM5 模式的新显式云物理方案的建立和耦合及原微物理方案的对比分析. 北京: 北京大学.

史月琴,楼小凤,邓雪娇,等. 2008a. 华南冷锋云系的中尺度和微物理特征模拟分析. 大气科学, 32(5): 1019-1036.

史月琴,楼小凤,邓雪娇,等. 2008b. 华南冷锋云系的人工引晶催化数值试验. 大气科学, 32(6): 1256-1275.

孙晶,楼小凤,胡志晋,等. 2008. CAMS 复杂云微物理方案与 GRAPES 模式耦合的数值试验. 应用气象学报, 19(3): 315-325.

孙晶,楼小凤,史月琴. 2011. 不同微物理方案对一次梅雨锋暴雨过程模拟的影响. 气象学报, 69(5): 799-809.

夏丽花,冯玲,曾光平. 2003. 福建省干旱概况及夏旱期间人工增雨条件分析. 应用气象学报, 14(s): 143-150.

闫之辉,王雨,朱国富. 2010. 国家气象中心业务数值预报发展的回顾与展望. 气象, 36(7): 26-32.

杨舒楠,何立富. 2013. 2013 年 8 月大气环流和天气分析. 气象, 39(11): 1521-1528.

张邢,王广河,楼小凤,等. 2013. 对流云盐粉催化的数值模拟研究. 气象, 39(8): 1057-1068.

郑国光,郭学良. 2012. 人工影响天气科学技术现状及发展趋势. 中国工程科学, 14(9): 20-27.

Breed D, Rasmussen R, Weeks C, et al. 2014. Evaluating winter orographic cloud seeding: Design of the Wyoming weather modification pilot project (WWMPP). J Appl Meteor Climatol, 53(2): 282-299.

Gao W H, Zhao F S, Hu Z J, et al. 2011. A two-moment bulk microphysics coupled with a mesoscale model WRF: Model description and first results. Adv Atmos Sci, 28(5): 1184-1200.

Guo X L, Fu D H, Zheng G G. 2007. Modeling study on optimal convective cloud seeding in rain augmentation. J Korean Meteor Society, 43(3): 273-284.

Hu Z J. 2005. CAMS cloud resolving model system. Chinese Academy of Meteorological Sciences Annual Report, 18-20.

Lou X F, Breed D. 2011. Model evaluations for winter orographic clouds with observations. Chin Sci Bull, 56(1): 76-83.

Lou X F, Shi Y Q, Sun J, et al. 2012. Cloud-resolving model for weather modification in China. Chin Sci Bull, 57(9): 1055-1061.

Xue L L, Tessendorf S, Nelson E, et al. 2013. AgI cloud seeding effects as seen in WRF simulations. Part II: 3D real case simulations and sensitivity tests. J Appl Meteor Climatol, 52(6): 1458-1476.