

嵇磊,周珺,李宏宇,等. 2014. 基于 BJ-RUC 系统的人影冷云催化潜力识别模式平台设计. 气象, 40(8):981-991.

基于 BJ-RUC 系统的人影冷云催化 潜力识别模式平台设计^{*1}

嵇 磊^{1,2,3,4,5} 周 珺¹ 李宏宇⁶ 张 磊²

- 1 中国科学院大气物理研究所,北京 100029
- 2 北京市人工影响天气办公室,北京 100089
- 3 中国气象局北京城市气象研究所,北京 100089
- 4 北京市气象局云降水物理研究与云水资源开发北京市重点实验室,北京 100089
- 5 中国科学院大学,北京 100049
- 6 中国气象局人工影响天气中心,北京 100081

提 要：提前准确识别冷云催化潜力,有助于提升人工影响天气作业的科学水平,是实现气象现代化的重要保障。北京市人工影响天气办公室基于 BJ-RUC 系统,设计研发了北京人影冷云催化潜力识别模式平台(BJ-CCSPR 平台)。该平台通过后台支撑系统和前台分析系统的有机结合,具有自动处理数据监测、模式计算、人影业务产品制作与显示等功能,并能实现人机交互操作。冷云综合催化潜力指标基于 BJ-RUC 系统输出的三维云宏微观物理量条件、热力和动力条件设计研发,可直观地提供人影催化潜力区的空间和地域分布,具有较强的科学性和可信度。业务应用表明:该平台性能稳定,自动化程度较高,易于扩展,实用性强;与 BJ-RUC 系统结合,业务产品基本可以反映未来 24 h 内人影相关物理量场的变化情况;地基增雪和飞行增雨典型实例说明冷云综合催化潜力指标可直接服务于人影决策指挥,在实际业务中发挥重要作用。

关键词：BJ-RUC, BJ-CCSPR, 冷云综合催化潜力指标, 人工影响天气

中图分类号：P481,P482 **文献标志码：**A **doi：**10.7519/j.issn.1000-0526.2014.08.008

Cold Cloud Seeding Potentials Recognition Platform of Weather Modification Based on the BJ-RUC System

Ji Lei^{1,2,3,4,5} ZHOU Jun¹ LI Hongyu⁶ ZHANG Lei²

- 1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
- 2 Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089
- 3 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089
- 4 Beijing Key Laboratory of Cloud, Precipitation and Water Resources, Beijing Meteorological Service, Beijing 100089
- 5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049
- 6 Weather Modification Centre, CMA, Beijing 100081

Abstract: Recognizing cold cloud seeding potentials accurately in advance can improve the scientific skill of artificial weather modification and guarantee the realization of meteorological modernization. Based on BJ-RUC system, the cold cloud seeding potentials recognition platform of weather modification in Beijing (BJ-CCSPR platform) was designed by Beijing Weather Modification Office. With the combination of back-ground supporting system and foreground analyzing system, the platform has the functions of data monito-

^{*} 公益性科研院所基本科研业务费专项基金(IUMKY201313PP0403)、国家自然科学基金项目(41105016)、北京市优秀人才培养资助项目(2012D002034000001)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306065)和北京市气象局科技项目(BMBKJ201403012 和 BMBKJ201403013)共同资助
2013 年 8 月 12 日收稿; 2014 年 5 月 26 日收修定稿
第一作者:嵇磊,主要从事探测资料分析与数值模拟研究. Email:xman1982426@163.com

ring, model calculation, generation and display of the operation products and human-computer interactive operations. Based on the 3-dimension macro- and micro- physical quantities, thermodynamic and kinetics factors, the comprehensive indices of cold cloud seeding potentials are designed, having high levels of scientificity and creditability and being able to provide the distribution of 3D and 2D seeding potential areas directly. The operational application indicates that: This platform has stable performance and high automation; it's easy to expand and practical highly; operational products which is combined with BJ-RUC system can primarily forecast the variation of physical quantity associated with weather modification in the next 24 hours; the classic examples of a ground-based flare seeding case and an aircraft seeding case indicate that the comprehensive indices of cold cloud seeding potentials can serve weather modification decision-making and command progress directly and play an important role in practical operation of weather modification.

Key words: BJ-RUC, BJ-CCSPR, the comprehensive index of cold cloud seeding potentials, weather modification

引 言

随着人工影响天气事业在我国的蓬勃发展,各省市不仅在作业装备上日益精良,许多地区还基于多种数据,开发了具有地域特点的人影催化潜力识别平台,力求提高人工影响天气作业效率(李大山, 2012)。目前,大多数此类平台对人影催化潜力的识别主要基于对观测资料的分析,尤其是多普勒天气雷达系统(陈冰等, 2003; 吴海英等, 2003; 李云川等, 2005; 唐林等, 2007; 舒志亮等, 2009; 李红斌等, 2010; 吴汪毅等, 2011)在增雨、防雹等方面有着大量应用;部分省市还将探空、卫星等资料应用于催化潜力识别(德力格尔, 1997; 叶田等, 2001; 王以琳等, 2002; 金凤岭等, 2006; 黄毅梅等, 2007)。

由于观测资料只反映局地短时天气状态,其仅能对人影催化潜力进行短时段的外推识别,主要应用于作业现场指挥。然而,准确把握未来较长时间(一般为 24 h)的天气变化可为人工影响天气作业争取到充足的决策准备时间,这对实际人影业务,尤其是日常飞机增雨及重大活动的天气保障至关重要,数值预报业务模式恰好在这方面发挥了积极作用。连志鸾等(2005)利用常规探空和 T213 数值预报产品,开发了几种人工增雨宏观诊断场实时应用于 MICAPS 平台,并在此基础上初步划分了催化等级,为地市级作业提供参考;张正国等(2009)和刘丽君等(2009)将耦合了双参数云降水方案的 GRAPES 模式在广西进行了本地化应用,计算出多种云宏微观物理量 24 h 的预报产品,并就部分物理量产品质量与探空资料进行了对比,为人影作业预

警指挥提供重要参考;周毓荃等(2001; 2002)在 MM4 基础上,建立了一套实时业务运行的中尺度层状云系数值预报业务系统,对降水和云场具有一定预报能力,为河南省人影作业决策提供帮助;王以琳等(2001; 2007; 2008)应用 MM5 模式计算人工增雨、防雹指标,并建立了 48 h 内(3 h 间隔)各物理量预报产品,通过网页形式调用,为山东省人影作业提供丰富参考信息。此外,部分地区还综合观测与数值模式预报产品,基于不同平台设计了适合本地需要的人影业务系统(吴万友等, 2012; 吴林林等, 2013)。

北京市人工影响天气工作经过多年发展,对高质量、高分辨率气象资料的需求越来越迫切。因此,北京人影基于北京快速更新循环同化预报系统(以下简称 BJ-RUC 系统),通过对 WRF 模式后处理模块的二次开发,计算得到一系列人工影响天气相关宏微观物理量场在未来 24 h 内(1 h 间隔)的变化(08:00 和 20:00 起报结果可计算未来 72 h 的变化),并重点针对冷云(即 $T < 0^{\circ}\text{C}$ 的云体)分析得到可直接指导人影作业的冷云综合催化潜力指标产品,形成北京市人工影响天气冷云催化潜力识别模式平台(以下简称 BJ-CCSPR 平台)。本文将详细介绍该平台的设计思路、组成结构、主要功能和指标体系设计,并通过具体实例简单分析其应用情况。

1 平台设计思路与开发目标

1.1 设计思路

BJ-RUC 系统由中国气象局北京城市气象研究所建立。它基于 WRF 模式和 WRF 3dvar 系统,每

隔 3 h 同化一次最新的常规 GTS 资料,北京地区最新的自动站观测和地基 GPS 等资料,模式最高的 3 km 水平分辨率预报范围覆盖京津冀地区(范水勇等,2009),主要提供未来 24 h 内的多要素逐时产品,部分起报时次可提供未来 72 h 预报,为北京及周边地区的天气预报服务。依据不同预报时效,其计算耗时约 1.5~3.5 h。该系统从 2007 年汛期开始业务化运行至今,成功服务于北京 2008 年奥运会和 60 周年国庆庆典等大型活动的天气保障任务。大量研究(范水勇等,2008;2009;郑祚芳,2008;陈敏等,2010;2011;李青春等,2011;魏东等,2010;2011a;2011b)表明:BJ-RUC 系统的预报要素质量与实况的一致性较好;随着时效的增长其预报误差有所增大,但对天气形势的整体变化趋势判断较准确;在临近预报中具有较高参考价值。

为了加快首都气象现代化建设,提升北京人影科技实力,北京市人影办于 2010 年初着手研发 BJ-CCSPR 平台。该平台与北京市数值预报业务系统相结合,充分展现出该平台的地域特色和蓬勃生命力,既节约了计算资源和扩展了 BJ-RUC 系统的应用领域,又使北京人工影响天气工作与北京市气象局大业务框架更加协调。

1.2 开发目标

紧密依托 BJ-RUC 系统,改进 WRF 模式后处理模块,增加人工影响天气相关诊断物理量场的计算过程,设计本地人工影响天气冷云催化潜力分级指标体系,分析逐小时冷云综合催化潜力指标等人影指导产品形成 BJ-CCSPR 平台,服务于环北京地区的实际人工影响天气业务。

该平台可根据 BJ-RUC 系统的预报输出实时运行,自动筛选最新预报数据,智能检测和剔除错误数据并记录运行日志;自动生成图片格式人影业务指导产品,并可根据实际需求修改;计算得到的资料能够应用于北京市人工影响天气业务管理/作业指挥系统(以下简称北京人影管理指挥系统),实现人机交互实时操作,提高人工影响天气业务水平。

2 平台结构与主要功能

2.1 平台结构

为了更好地服务人影业务,BJ-CCSPR 平台主

要分为后台支撑系统和前台分析系统两大部分,如图 1 所示。后台支撑系统基于 Linux 操作系统,主要功能包括数据监测和模式计算,目的是生成可靠的 GRADS 格式数据供前台分析系统使用;前台分析系统基于 Windows 操作系统,主要功能包括人影业务产品制作与显示和人机交互操作,用于实际人影决策指挥。

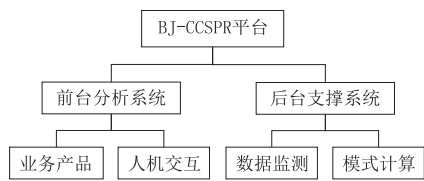


图 1 BJ-CCSPR 平台结构框图
Fig. 1 Structure diagram of BJ-CCSPR platform

2.2 后台支撑系统

该部分基于 Linux 操作系统。模式计算部分采用 Fortran90 编程语言,数据监测部分为服务器脚本语言。

2.2.1 模式计算

该功能主要基于 WRF 模式的后处理模块 AR-WpostV2.2。该模块可对 BJ-RUC 系统的预报物理量进行读取和筛选,并可通过修改和添加程序代码以调整或增加相关诊断量的计算和输出,最终转换成 Grads 或者 Vis5D 格式数据。图 2 为该后处理模块的运行流程图,诊断量的计算和作业区数据的截取为该模块主要修改部分(图 2 阴影部分)。

诊断量主要增加了: 0°C 层高度,云顶、云底高度,45 dBz 回波顶高,涡度和散度,水面、冰面和实际饱和水汽压计算,将水汽、云水、雨水、冰、雪、霰这六类水物质的比含水量值(单位: $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)转换为质量浓度值(单位: $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);在此基础上,设计出适合北京地区的人影冷云催化潜力分级指标体系,分析得到冷云综合催化潜力指标:催化潜力(seed3D)、组合催化潜力(seed2D)及最佳催化高度(seedH),以最直观的方式为人影业务提供精细化指导产品。2.4 节将详细介绍冷云催化潜力分级指标体系设计和综合催化潜力指标的制定方案。

由于 BJ-RUC 系统的预报范围超出北京人影作业区域,而超出部分显然会增加计算负担和运行时间,因此需要对作业区数据进行截取。具体实现方法为:在 namelist. ARWpost 文件的 &interp 部分

添加 cut_area 逻辑控制变量(0:取消作业区数据截取;1:进行作业区数据截取)和 margin 数组变量,并修改部分 fortran 程序。margin 数组由 4 个整型值组成,分别表示需要舍去的源数据在西、东、南、北四

个水平方向的格点数。
数据以 Grads 格式输出,时间分辨率为 1 h。垂直方向按位势高度从距地面 25 m 至 16 km 划分为不等距 28 层,兼顾人影业务各方面需求。

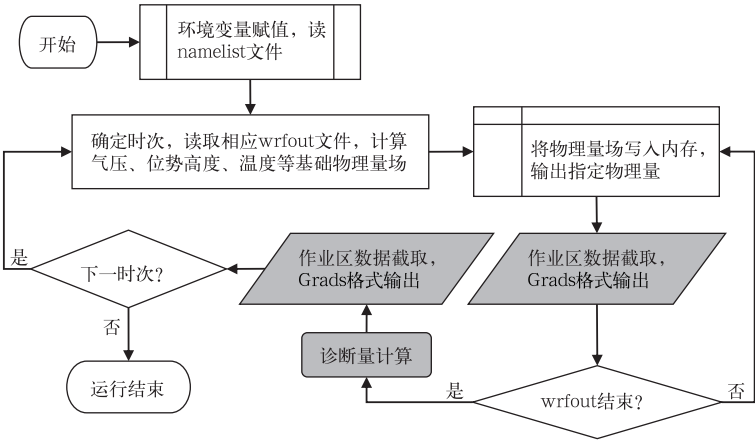


图 2 ARWpostV2.2 运行流程图
Fig. 2 Flow diagram of ARWpostV2.2

2.2.2 数据监测

BJ-RUC 系统每次运行结束后,自动将预报数据压缩并通过 FTP 传输至北京市人影办的 Linux 服务器端指定目录。服务器通过定时启动可执行脚

本,主要实现以下功能:判断最新 BJ-RUC 预报数据;数据传输等待和超时任务终止;判断数据分析时段;计算任务自动提交;数据实时传输至前台分析系统;记录运行日志等。数据监测详细流程参见图 3。

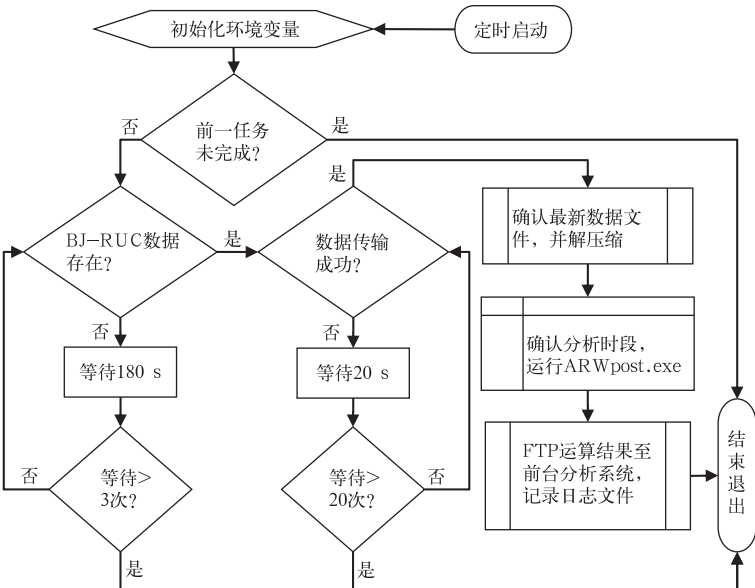


图 3 数据监测流程图
Fig. 3 Flow diagram of data monitoring

2.3 前台分析系统

该部分基于 Windows 操作系统。业务产品通

过 Grads 脚本语言绘制成 png 格式图片产品,显示终端由 VC++ 语言编写;北京人影管理指挥系统能够读取 Grads 格式数据,实现人机交互操作。

2.3.1 业务产品

人影业务产品主要包括:各高度层水汽、液水(包括云水和雨水),固态水(包括冰、雪、霰)质量浓度;反演的雷达最大反射率因子;地面 3 h 累积降水量;北京地区主要站点相关物理量场的时间演变序列;固定高度 seed3D 指标;seed2D 与 seedH 指标叠加等。为了提高效率,仅绘制 8 km 以下相关产品。

该部分通过 Windows 计划任务定时启动 Grads 制图脚本生成相应图片文件。Grads 制图脚本可根据实际需求及时进行调整,增强了使用的灵活性。图片以时间(BJT)命名,即:yyyymmddhh.png,并分类存储于不同目录,并定期执行历史数据整理。图 4 为业务产品显示终端,可实时更新文件列表,双击左侧图片名称便可在右侧区域显示相关内容。

2.3.2 人机交互

北京人影管理指挥系统综合了日常业务管理、作业指挥等多项功能,通过 JAVA 语言开发。它可以综合分析地面自动站、雷达、卫星、LAPS、飞行探测、模式数据等资料,也可管理人影弹药、作业记录和作业人员基本信息等资料。

在模式应用方面,其主要功能包括:任意多物理量场的叠加与消隐,等值线与填色图的转换,任意垂直剖面的截取,与飞行轨迹等实际探测数据的交互显示等。该系统由数据选择区、图形显示区、剖面显示区、图层面板等组成,并于 2011 年 6 月正式投入试运行。

2.4 冷云综合催化潜力指标

冷云人工增雨作业主要通过向云中适合催化的区域,即催化潜力区,播撒催化剂(一般为 AgI),促进云降水物理过程的发展,最终起到增加地面降水的目的。因此,对于催化潜力区的识别至关重要。在这方面,大量研究(迟竹萍等,2001;李永振等,2003;刘文,2005;李薇等,2006;李红斌等,2008;肖卉等,2008;林长城等,2011;孙鸿娉等,2011;赵姝慧等,2012)基于观测提出用于识别潜力区的催化指标。众多学者选取人工增雨实例,进一步结合数值模式分析催化指标的指导意义(洪延超等,2006;2011;王以琳等,2006;2009;翟菁等,2008;2010)。胡志晋(2001)初步总结了催化潜力区的识别方法,并提出了催化剂量和催化部位的选择方案。

表 1 冷云综合催化潜力指标
Table 1 The comprehensive indices
of cold cloud seeding potentials

名称	维数	含义
seed3D	xyz	催化潜力区三维空间分布
seed2D	xy	催化潜力区二维地域分布
seedH	xy	最佳催化高度层

本文通过综合分析 BJ-RUC 系统输出的三维云宏微观物理条件、动力和热力条件,设计本地化的冷云催化潜力分级指标体系,分析得到冷云综合催化潜力指标——seed3D、seed2D、seedH。其含义如表 1 所示,具体实现步骤如下:

在模式 $x-y-z$ 三维空间内,当前格点 D_{xyz} 的温度 $T < 0^{\circ}\text{C}$,并且高度 $H \leq 8\text{ km}$ (考虑人影催化技术手段在实施高度上的局限性)时,进行如下条件分析:

- (1) 水汽压 e 是否饱和。若 $e > e_s$ (水面饱和水汽压),则 seed3D_{xyz} 增加 2 分;若 $e > e_i$ (冰面饱和水汽压),则 seed3D_{xyz} 增加 1 分;否则不得分。
- (2) 云水含量 Q_c 是否达到一定阈值。若 $Q_c > 0.2\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,则 seed3D_{xyz} 增加 3 分;若 $Q_c > 0.05\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,则 seed3D_{xyz} 增加 1 分;否则不得分。
- (3) 雪水含量 Q_i 是否达到一定阈值。若 $Q_i > 0.5\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,则 seed3D_{xyz} 增加 2 分;若 $Q_i > 0.02\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,则 seed3D_{xyz} 增加 1 分;否则不得分。
- (4) 霰含量 Q_g 是否达到一定阈值。若 $Q_g > 0.5\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,则 seed3D_{xyz} 增加 3 分;若 $Q_g > 0.02\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,则 seed3D_{xyz} 增加 1 分;否则不得分。

由于 BJ-RUC 系统采用 WSM6 微物理方案,因此以上仅对部分水物质的质量浓度进行阈值分析。水汽压 e 和云水含量 Q_c 与贝吉隆过程密切相关(胡志晋,2001);雪和霰的含量高低也反映出自然状态下云中适合降水产生的难易程度。以上 4 步基于微物理特征量对催化潜力区进行分析,其阈值依靠经验选取。seed3D_{xyz} 分值越高,说明当前格点催化等级越高,越有利于人影作业。

当 seed3D_{xyz} > 4 时,进入以下分析流程:

- (5) 考虑冰晶凝华增长速率同温度有关(Pruppacher et al,1978): -15°C 附近凝华快,聚并强,对冰晶增长有利; $T > -5^{\circ}\text{C}$ 时,除对流上升速度较大区域以外,引晶增雨效果比较差。因此,若当前格点 $T \leq -5^{\circ}\text{C}$,则 seed3D_{xyz} 增加 1 分;根据 Grant 等(1974)提出的“播云温度窗”理论,结合国内的实际

应用情况(章澄昌,1992),若 $T \in [-10^{\circ}\text{C}, -24^{\circ}\text{C}]$, 则 $\text{seed}3D_{xyz}$ 增加 2 分。这里主要考虑大气热力条件对冰晶增长的影响。

(6) 考虑云中上升气流在降水中的关键性作用(胡志晋等,1983),可设 $W \geq 0.005 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $\text{seed}3D_{xyz}$ 增加 1 分;若 $W \geq 0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $\text{seed}3D_{xyz}$ 增加 2 分; $W \geq 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $\text{seed}3D_{xyz}$ 增加 3 分。这里主要考虑大气动力条件对降水的影响。

以上 6 步完成了催化潜力($\text{seed}3D$)指标的计算,得到三维空间上的催化潜力区分布。其中,(1)~(4)步对水物质含量的分析是进行(5)~(6)步分析的前提。如果云中水物质含量不足,则仅靠大气热力和动力条件并不能达到催化后成云制雨的目的。因此,只有当云中水物质含量满足条件后,进行大气热力和动力条件的分析才会更加突显催化潜力区的意义。一般来说,当 $\text{seed}3D$ 指标分值达到 6 以上时,即在(1)~(4)步至少得到 5 分的基础上,(5)~(6)步至少每步得 1 分,说明该区域的水物质含量和动力热力条件都满足,即具有一定的催化潜力。

完成 $\text{seed}3D$ 指标计算后,基于模式 x - y 面,做垂直(z)方向上的分析,完成 $\text{seed}2D$ 和 $\text{seed}H$ 指标的计算。步骤如下:

(7) 将当前格点 D_{xy} 垂直方向上 $\text{seed}3D$ 指标最大值赋予 $\text{seed}2D_{xy}$,其对应高度即为 $\text{seed}H_{xy}$ 。

徐华英等(1980)和黄美元等(1999)通过数值试验证明,当云中存在云泡,即具有较高的含水量和垂直气流起伏时,比较薄的云就可以形成较大的水滴或者冰雹,或者说降低了形成降水对云厚的要求。结合徐华英等(1980)的数值试验和尚博等(2012)应用 Cloudsat 卫星资料的分析,选取 2 km 云厚作为北京地区降水云的临界阈值。此外,胡志晋(2001)还指出层状云增雨条件中需要注意降水下落蒸发的条件,因此需要考虑云底相对于地面的高度。综合以上分析,设计步骤(8):

(8) 考虑云层厚度 H_{thick} 和云底距地面高度 H_{blank} 。在当前格点 D_{xy} 垂直方向上,当 $\text{seed}2D_{xy} > 6$ 且上升气流 $W \geq 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,即云中存在云泡时, $\text{seed}2D$ 指标由表 2 来确定增加量。

H_{thick} 和 H_{blank} 的计算方法如式(1)。

$$\begin{aligned} H_{\text{thick}} &= H_{\text{top}} - H_{\text{base}} \\ H_{\text{blank}} &= H_{\text{base}} - H_{\text{terr}} \end{aligned} \tag{1}$$

式中, H_{top} 为云顶高度, H_{base} 为云底高度, H_{terr} 为地

形高度。云顶和云底高度以 7 dBz 反射率强度对应高度计算(Holleman,2001)。ARWpost 后处理模块包含反射率因子的计算方法。

表 2 云厚与云底距地高度对催化潜力的影响
Table 2 Influences of cloud thickness and height between cloud base and surface on seeding potentials

$H_{\text{thick}}/\text{km}$	$H_{\text{blank}}/\text{km}$	$\text{seed}2D_{xy}$ 加分
[2.0—3.0)	$< H_{\text{thick}}/5$	+1
[3.0—4.0)	$< H_{\text{thick}}/5$	+2
[4.0—6.0)	$< H_{\text{thick}}/5$	+3
≥ 6.0	< 2.0	+4

(9) 考虑降雹因素。Holleman(2001)在对冰雹云进行雷达观测时指出,45 dBz 反射率强度对应高度大于 8 km 对冰雹产生具有指示作用。因此,在当前格点 D_{xy} 垂直方向上,当 45 dBz 回波高度大于 8 km 时, $\text{seed}2D_{xy}$ 增加 20 分,以突显冰雹灾害天气发生的可能,起到提前预警的作用。

以上介绍了冷云催化潜力分级指标体系设计,分析得到冷云综合催化潜力指标。其中,(1)~(6)步得到的 $\text{seed}3D$ 指标表示了三维空间内催化潜力分布;(7)~(9)步完成了组合催化潜力($\text{seed}2D$)和最佳催化高度($\text{seed}H$)指标的计算。 $\text{seed}2D$ 指标表示催化潜力区的地域分布, $\text{seed}H$ 指标表示了最适合催化的潜力区高度。 $\text{seed}3D$ 和 $\text{seed}2D$ 指标分值越高,相应区域催化潜力越大。

该设计对 BJ-RUC 系统逐时输出进行分析,可提供催化部位和催化时段信息,具有较高科学性,但缺少对催化剂用量的评估,需要进一步研究。

3 应用实例

下面选取典型人工增雨(雪)天气过程,简单展示 BJ-CCSPR 平台的业务应用情况。文中出现时间均为北京时。为了更好地展示效果,业务产品不采用屏幕截图,而直接给出相关图片。

3.1 地基增雪过程

受东移南下冷空气和偏南暖湿气流的共同影响,2011 年 2 月 26—27 日中午,北京地区出现了两次明显的全市性降雪天气过程。

图 5 对比了车道沟站在整个降雪过程中相对湿度随时间的演变情况。图 5a 为微波辐射计的观测

反演结果;图 5b 为 2011 年 2 月 25 日 20:00 起报的 BJ-RUC 系统预报结果。可以发现:BJ-RUC 系统成功预报出了两次降雪生消过程;26 日的降雪过程预报较为准确;27 日的降雪过程在时间上有所提前,但在之后的预报中(图略),降雪时间有了较好的订正,更加符合实况。

为了充分抓住有利催化条件,北京市人工影响天气办公室结合 BJ-CCSPR 平台分析结果,提前对

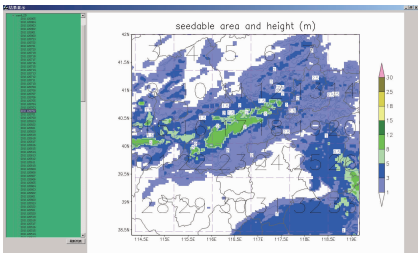


图 4 业务产品显示终端

Fig. 4 Display terminal of operational products

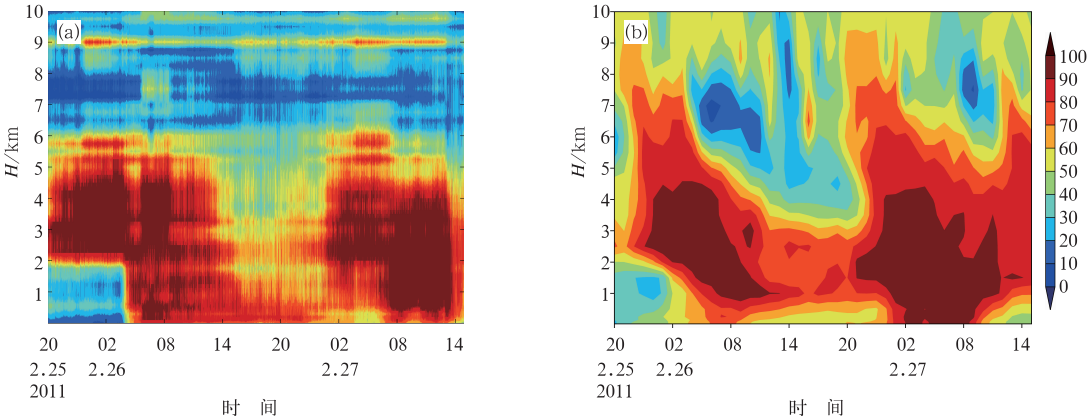


图 5 2011 年 2 月 25 日 20:00 至 27 日 15:00 车道沟站 RH 时间演变图

(a)微波辐射计, (b)BJ-RUC

Fig. 5 Evolution of RH at Chedaogou station from 20:00 BT 25 to 15:00 BT 27 February 2011

(a) microwave radiometer, (b) BJ-RUC

地面作业站点进行了弹药补给,并对空域申请系统专线进行了检查维护和系统运行测试,顺利开展了地面 AgI 烟炉和火箭增雪作业。

分析 2011 年 2 月 26 日 20:00 起报的 BJ-RUC 系统预报数据得到 27 日 09:00 环北京地区组合催化潜力(seed2D)和最佳催化高度(seedH)。图 6 中填色图代表 seed2D 指标,红色等值线为 seedH 指标,黑色三角(▲)代表 27 日 09:00 $\pm$ 0.5 h 内实际催化作业站点分布。可以发现:在具有催化设备的区县,催化作业站点的疏密程度与相应催化潜力等级有较好的对应关系,等级越高,作业密度越大。

图 6 中 seed2D 指标分值大于 6 的催化潜力区主要分布在北京南部、东北部及滦平、兴隆一带和河北西北部,与图 7a 所示雷达 10 dBz 以上组合反射率因子分布相似,但前者范围较大,尤其是河北西北部的催化潜力区并没有在图 7a 上出现对应的云区,这是因为本次降雪过程云层较低,雷达无法探测到该地区的云层,但在之后的观测中(图略),当该云层

移近北京后,也发现有大片 10 dBz 以上的回波存

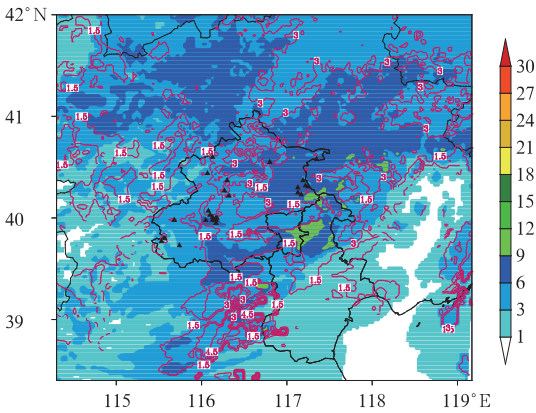


图 6 2011 年 2 月 27 日 09:00 实际催化作业站点(▲)分布与 seed2D (填色图)+ seedH (红色等值线)指标对比

Fig. 6 Comparison between the distribution of operational seeding stations (▲) and the index of seed2D (shaded) with seedH (red contours) at 09:00 BT 27 February 2011

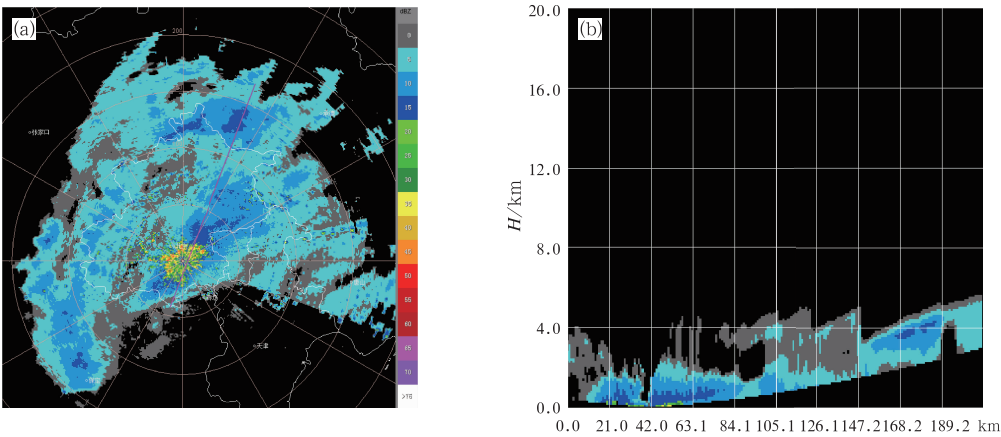


图 7 2011 年 2 月 27 日 09:00 雷达反射率因子 (单位: dBz)

(a)组合反射率, (b)垂直剖面
(沿图 7a 紫色线,从西南到东北向)

Fig. 7 Radar reflectivity at 09:00 BT 27 February 2011

(a) CR, (b) vertical section
(along the purple line in Fig. 7a, from southwest to northeast)

在,说明该区域确实存在一定的催化潜力;seedH 指标在北京主要处于 1.5 km 左右,河北北部达到 3 km 以上,这与图 7b 所示 10 dBz 以上雷达回波剖面高度较为一致,说明 seedH 指标能够准确识别最佳催化高度。

综上所述,对于本次增雪作业,冷云综合催化潜力指标能够较准确地识别催化潜力区地域分布,并给出最适合实施催化的高度,与实际观测结果基本一致。BJ-CCSPR 平台提前至少 40 h 给出了较准确的天气变化形势,并提前约 10 h 得到了较可靠的冷云催化潜力识别产品,为北京人影作业争取到了宝贵的准备时间,并对作业时机和作业工具的选择及时提供了直观有效的参考信息。

3.2 飞机增雨过程

受高空冷涡天气系统的影响,2011 年 10 月 13 日凌晨开始,北京及其周边地区出现了一次影响范围较广的降水过程。北京市人工影响天气办公室结合 BJ-CCSPR 平台分析结果,择机进行了地面火箭和飞机增雨作业。2011 年 10 月 13 日 8:00—10:00,北京市一架人影作业飞机在河北省滦平、兴隆一带开展了机载 AgI 烟条人工增雨作业。由于该飞机未安装云物理探测仪器,因此以下仅对飞行过程中的部分宏观记录信息和南郊雷达观测信息进行分析对比。

图 8 为 2011 年 10 月 13 日 10:00 雷达反射率

观测。本次过程为积层混合云降水,3 km 高度的雷达反射率因子(图 8a)显示云体基本移出北京,位于河北省东部,强度介于 20~35 dBz 之间,其中 35 dBz 左右强度回波呈南北向带状分布。沿图 8a 中紫色直线做剖面得到图 8b,可以看出,局地有小对流镶嵌于整个云体中,部分伴有 40 dBz 以上回波中心,回波较强位置主要位于 3~4 km 高度,7 dBz 回波对应顶高约为 7 km 左右。

将 13 日 10:00 冷云综合催化潜力指标 seed3D 沿 117.48°E 做剖面(起报时次为 2011 年 10 月 13 日 02:00),如图 9 所示,红色等值线为温度,黑色等值线为上升气流,填色图为 seed3D 指标,紫色矩形框为飞行催化区域。通过与实际作业信息对比可见:预报的催化层温度与实际探测结果-7℃较一致;催化区上升气流较强印证了飞行日志中记载的作业区有较强的颠簸现象。seed3D 指标显示最佳催化高度介于 3~4 km,这与图 8b 所示雷达观测得到的较强回波所处高度一致,说明冷云综合催化潜力指标 seed3D 能够将三维空间的催化潜力区进行分级,并准确识别出催化潜力较高的空间。实际作业高度为 3.5~3.7 km,处于 seed3D 指标的中上部,这主要是因为作业区下垫面为山地,有最低飞行安全高度 3.6 km 的限制。

图 10 为冷云综合催化潜力指标(seed2D、seedH)和飞行催化轨迹在北京业务管理指挥系统中通过人机交互叠加显示的结果。在选定预报时

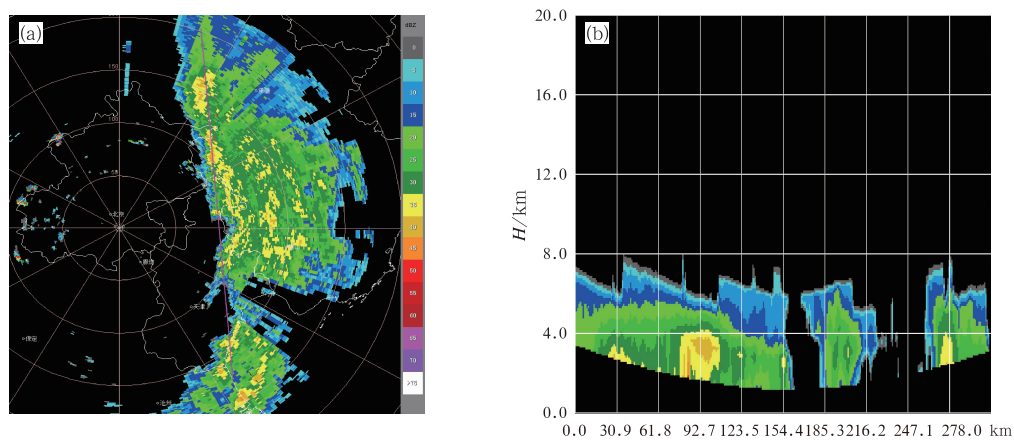


图 8 2011 年 10 月 13 日 10:00 雷达反射率因子 (单位: dBZ)
(a)3 km 高度, (b)垂直剖面
(沿图 8a 紫色线,从北向南)

Fig. 8 Radar reflectivity at 10:00 BT 13 October 2011 (unit: dBZ)
(a) 3 km height, (b) vertical section
(along the purple line in Fig. 8a, from north to south)

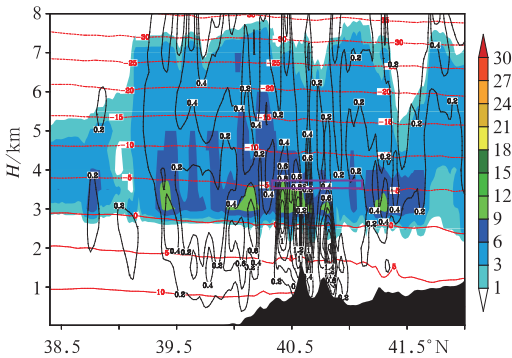


图 9 2011 年 10 月 13 日 10:00 冷云综合催化
潜力指标 seed3D 在 117.48°E 的剖面
Fig. 9 The section of the index of
seed3D along 117.48°E longitude
at 10:00 BT 13 October 2011

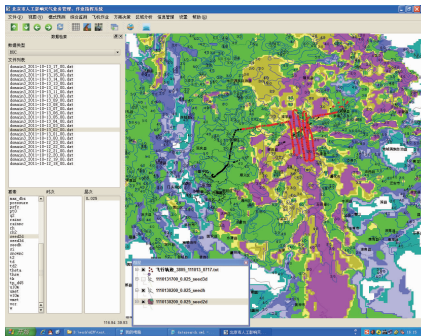


图 10 北京人影管理指挥系统综合显示
Fig. 10 The comprehensive display of Beijing
WM management and command system

次、物理量和高度层后,相关结果显示于右侧图形区,图层面板列出了所选择的物理量场。图形区内 seed2D 指标以填色图表示,seedH 指标以等值线表示;粗线条为飞行轨迹,其中红色部分为催化作业路径。seed2D 指标给出的催化潜力区地域分布基本成南北方向,粉色区域对应分值介于 9~12,说明该地区不仅水物质含量丰富,而且相应的动力热力和云厚条件都较好,绿色区域对应分值介于 3~6,说明该地区有一定水物质含量,但是缺乏动力热力等条件。seed2D 指标与图 8a 所示 35 dBZ 强回波的分布基本一致,说明 seed2D 指标能够较准确地给出云发展较旺盛的位置。实际飞机催化作业区与 BJ-CCSPR 平台分析得到的最佳催化潜力位置十分吻合,飞行催化高度介于最佳催化潜力高度范围内。

综上所述,对于本次飞机增雨过程,冷云综合催化潜力指标对催化潜力区的识别在三维空间分布和地域分布以及最佳催化高度上,都给出了较准确的结论,与雷达观测结果一致,具有较高的可信度。BJ-CCSPR 平台提前约 24 h 给出了本次降水过程的演变情况(图略),并提前约 6 h 计算出较为可信的冷云综合催化潜力指标,对人影业务有直观的指导效果,通过实时操作不同类型数据,北京人影管理指挥系统极大地方便了业务人员指导人影作业。

4 结 论

为了满足北京人影业务的切实需求,基于 BJ-

RUC 系统开发了 BJ-CCSPR 平台,结果表明:

(1) 该平台紧密依托先进的北京数值预报业务系统 BJ-RUC,具有鲜明的地域特色和蓬勃生命力,极大地提高了资源使用效率,使北京人影工作与北京市气象局大业务框架更加协调。

(2) 该平台性能稳定,自动化程度高,易于扩展,实用性强。后台支撑系统可对模式数据进行严格检查并高效运行;前台分析系统既有直观的图片产品,也可以人机交互操作多种数据,方便业务人员使用。

(3) 冷云综合催化潜力指标(seed3D/seed2D/seedH)基于 BJ-RUC 系统输出的三维云宏微观物理条件、动力和热力条件进行设计。seedH 指标给出了最佳催化高度;seed3D 和 seed2D 指标分值的高/低表示了三维空间或二维地域内催化潜力的大/小,划分了模式预报空间的催化等级,具有较强的科学性。该指标体系提供了催化部位和催化时段信息,但缺少对催化剂用量的评估,需要进一步研究。

(4) 地基增雪和飞行增雨两个例表明,该平台产品提供的未来 24 h 内冷云综合催化潜力指标,能够较准确直观地给出冷云最佳催化时机和最佳催化潜力区分布,具有较高的可信度,在一定程度上满足人影业务的决策指挥工作;产品可根据需求及时改进,以简洁明快的方式最大化满足人影业务。

致谢:感谢对本文提供帮助的张蔷、陈敏、范水勇、仲跻芹、余东昌、刘小军和胡明福。

参考文献

陈冰,张深寿,冯晋勤. 2003. 新一代天气雷达产品在人工增雨作业中的应用. 气象,29(1):23-26.

陈敏,范水勇,郑祚芳,等. 2011. 基于 BJ-RUC 系统的临近探空及其对强对流发生潜势预报的指示性能初探. 气象学报,69(1):181-194.

陈敏,范水勇,仲跻芹,等. 2010. 全球定位系统的可降水量资料在北京地区快速更新循环系统中的同化试验. 气象学报,68(4):450-463.

迟竹萍,陈金敏,朱平盛. 2001. 利用数字化雷达回波参数分析人工增雨播云条件. 气象,27(4):46-49.

德力格尔. 1997. 青海省人工影响天气综合指挥系统. 气象,23(2):32-35.

范水勇,陈敏,仲跻芹,等. 2009. 北京地区高分辨率快速循环同化预报系统性能检验和评估. 暴雨灾害,28(2):119-125.

范水勇,郭永润,陈敏,等. 2008. 高分辨率 WRF 三维变分同化在北京地区降水预报中的应用. 高原气象,27(6):1181-1188.

黄美元,徐华英. 1999. 云和降水物理. 北京:科学出版社,126-128.

黄毅梅,陈跃,周毓荃,等. 2007. 基于 ArcGIS 的人工影响天气综合

分析平台. 气象,33(12):116-120.

洪延超,李宏宇. 2011. 一次锋面层状云云系结构_降水机制及人工增雨条件研究. 高原气象,30(5):1308-1323.

洪延超,周非非. 2006. 层状云系人工增雨潜力评估研究. 大气科学,30(5):913-926.

胡志晋. 2001. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨. 应用气象学报,12(S):10-13.

胡志晋,秦瑜,王玉彬. 1983. 层状冷云的数值模式. 气象学报,41(2):194-203.

金凤岭,张晰莹,张云峰,等. 2006. 新一代飞机人工增雨作业指挥系统研制与应用. 气象科技,34(4):470-473.

李大山. 2002. 人工影响天气现状与展望. 北京:气象出版社,421-444.

李红斌,何玉科,濮文耀,等. 2010. 多普勒雷达特征参数在人工防雹决策中的应用. 气象,36(10):84-90.

李红斌,何玉科,姚展予,等. 2008. 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. 气象,34(6):102-106.

李青春,程丛兰,高华,等. 2011. 北京一次冬季回流暴雪天气过程的数值分析. 气象,37(11):1380-1388.

李薇,李永振,汤达章. 2006. 使用 VIL 选择人工增雨作业区域. 气象科学,26(4):432-435.

李永振,李茂伦,李薇,等. 2003. 北方降水性层状云人工增雨潜力区的逐步判别研究. 应用气象学报,14(4):430-436.

李云川,张文宗,王建峰,等. 2005. 数字化雷达人工影响天气作业指挥系统. 气象科技,33(3):264-267.

连志鸾,邢开成. 2005. 层状云人工增雨宏观判据在 MICAPS 平台上的演示与应用. 气象科技,33(5):445-450.

林长城,陈彬彬,隋平,等. 2011. 闽西北地区降水回波特征和人工增雨作业条件分析. 气象科技,39(6):697-702.

刘丽君,张瑞波,张正国. 2009. 广西人工影响天气云系模式预报效果检验. 气象研究与应用,30(4):49-51.

刘文. 2005. 用极轨气象卫星资料分析飞机增雨云层条件. 气象科技,33(1):81-86.

尚博,周毓荃,刘建朝,等. 2012. 基于 Cloudsat 的降水云和非降水云垂直特征. 应用气象学报,23(1):1-9.

舒志亮,桑建人,陶涛,等. 2009. 宁夏人工影响天气作业指挥系统. 宁夏工程技术,8(3):221-223.

孙鸿娉,李培仁,闫世明,等. 2011. 华北层状冷云降水微物理特征及人工增雨可播性研究. 气象,37(10):1252-1261.

唐林,魏鸣,王治平. 2007. 湖南人工增雨云型的分析判别与多普勒天气雷达指挥系统的研制应用. 气象科学,27(1):95-100.

王以琳,边道相,刘文,等. 2001. 山东飞机人工增雨作业决策系统. 应用气象学报,12(S):185-193.

王以琳,黄磊. 2007. 地市级人工影响天气业务技术系统. 气象科技,35(4):535-540.

王以琳,刘文,王广河. 2002. 冷云人工增雨催化区的探空判据. 气象学报,60(1):116-121.

王以琳,王建国. 2006. 黄淮气旋中人工增雨播云区的探讨. 高原气象,25(1):128-137.

王以琳,魏建苏. 2009. 一次火箭人工增雨分析. 气象科学,29(2):260-265.

王以琳,薛晓萍,李曼华. 2008. 飞机人工增雨作业的决策方法. 高原气象,27(3):686-694.

魏东,孙继松,雷蕾,等. 2011a. 三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析. 气象,37(4):412-422.

魏东,尤凤春,范水勇,等. 2010. 北京快速更新循环预报系统(BJ-RUC)模式探空质量评估分析. 气象,36(8):72-80.

魏东,尤凤春,杨波,等. 2011b. 北京快速更新循环预报系统(BJ-RUC)要素预报质量评估. 气象,37(12):1489-1497.

吴海英,白卡娃,曾明剑,等. 2003. 火箭人工增雨和防雹雷达指挥系统. 气象科学,23(1):100-109.

吴林林,刘黎平,徐海军,等. 2013. 基于 MICAPS3 核心的人影业务平台设计与开发. 气象,39(3):383-388.

吴万友,黄芬根,宾振,等. 2012. 移动式人工增雨作业技术支撑系统的设计与实现. 气象,38(10):1288-1294.

吴汪毅,杨光. 2011. 运用雷达组网拼图建立精细化人工增雨作业参数. 气象,37(1):107-111.

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. 气象科学,28(4):440-443.

徐华英,李桂忱. 1980. 有云泡结构的对流云中降水形成的研究. 气象学报,38(3):260-268.

叶田,夏福华,藏传花,等. 2001. 淄博市人工影响天气作业决策指挥系统. 气象,27(10):46-48.

翟菁,黄勇,胡雯,等. 2010. 一次积层混合云降水过程增雨条件分析.

气象,36(11):59-67.

翟菁,周后福,冯妍,等. 2008. 数值模式产品应用于安徽省可增雨区预报的研究. 安徽农业科学,36(3):1153-1155.

章澄昌. 1992. 人工降水原理·人工影响天气概论. 北京:气象出版社,206.

张正国,邹光源,马占山,等. 2009. 广西人工影响天气模式预报系统. 气象研究与应用,30(增 1):3,44.

赵姝慧,秦鑫,李帅彬,等. 2012. 新一代天气雷达常用产品在我国人工影响天气工作中的应用. 地球科学进展,27(6):694-702.

郑祚芳. 2008. RUC 产品在一次强降水预报中的应用分析. 气象,34(专):85-88.

周毓荃,包绍武,黄毅梅,等. 2002. 中尺度层状云系数值预报系统及其业务化应用试验. 南京气象学院学报,25(6):731-739.

周毓荃,张存. 2001. 河南省新一代人工影响天气业务技术系统的设计、开发和应用. 应用气象学报,12(增):175-184.

Grant L O, Kahan A M. 1974. Weather modification for augmenting orographic precipitation. "Weather and climate modification", John Wiley & Sons, Inc.

Holleman I. 2001. Hail detection using single-polarization radar. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.

Pruppacher H R, Klett J D. 1978. Microphysics of Clouds and Precipitation. Riedel Publish Co. , Holland, 448-463.