

# 兴安盟地区一次冷涡系统影响下增雨过程分析

刘禹佃<sup>1</sup> 李雪雪<sup>2</sup> 祁蕾<sup>1</sup>

1. 兴安盟气象局, 中国·内蒙古 乌兰浩特 137400

2. 科右前旗气象局, 中国·内蒙古 科右前旗 137400

**摘要:** 论文所用资料有地面自动气象站观测资料、欧洲中心 ERA5 再分析资料 (水平分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ , 时间间隔为 1h)、多普勒天气雷达和飞机上宏观观测记录等。对 2023 年 6 月 10~12 日在兴安盟地区开展的飞机增雨作业个例进行分析。结果表明, 此次过程受冷涡系统影响, 系统维持稳定少动, 暖空气的强度随时间增强, 冷中心北移, 东北暖湿气流和西北干冷气流在东北地区产生交汇, 有利于降水天气的发生。根据天气系统的发展演变以及作业层的风向风速等条件, 科学开展飞机增雨作业, 作业结束后土壤墒情明显改善, 旱情有效缓解, 大部地区气象干旱基本解除。

**关键词:** 冷涡系统; 作业条件; 飞机增雨; 增雨

## Analysis of Rainfall Enhancement Process under the Influence of a Cold Vortex System in Xing'an League Area

Yutian Liu<sup>1</sup> Xuexue Li<sup>2</sup> Lei Qi<sup>1</sup>

1. Xing'an League Meteorological Bureau, Ulanhot, Inner Mongolia, 137400, China

2. Meteorological Bureau of Keyouqian Banner, Right Wing Front Banner, Inner Mongolia, 137400, China

**Abstract:** The data used in this paper includes observation data from ground automatic weather stations, ERA5 reanalysis data from the European Center (with a horizontal resolution of  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  and a time interval of 1 hour), Doppler weather radar, and macroscopic observation records from aircraft. Analyze the case of aircraft rain enhancement operation carried out in Xing'an League area from June 10-12, 2023. The results indicate that this process is influenced by the cold vortex system, which maintains stability and minimal movement. The intensity of warm air increases over time, and the cold center moves northward. The northeast warm and humid airflow intersects with the northwest dry and cold airflow in the northeast region, which is conducive to the occurrence of precipitation weather. Based on the development and evolution of the weather system, as well as the wind direction and speed of the operating layer, scientific aircraft rain enhancement operations were carried out. After the operation was completed, the soil moisture significantly improved, the drought was effectively alleviated, and meteorological drought in most areas was basically relieved.

**Keywords:** cold vortex system; homework conditions; aircraft rain enhancement; increase rainfall

## 0 前言

东北冷涡指在  $35^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ,  $115^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$  范围内 500hPa 高度上至少能分析出一条闭合等高线, 并且有冷中心或明显冷槽与之配合, 能持续 3 天或 3 天以上的冷性涡旋<sup>[1]</sup>, 作为中国重要的天气尺度系统之一, 是强对流天气接连发生的一种典型天气环境<sup>[2]</sup>, 也是常见而且明显的积层混合云降水系统之一<sup>[3]</sup>。积云内的演变过程是较为复杂的, 其中尤以东北冷涡所诱发的积云过程较为典型<sup>[4]</sup>。目前, 已有许多学者运用数值模式模拟东北冷涡中强对流天气及云物理发展的演变过程, 周德平等<sup>[5]</sup>利用 IAP 模式对一次冷涡降水过程进行了数值模拟, 结果表明, 前期云中对流较强, 以冰雹为主, 后期对流减弱, 持续降雨。耿树江等<sup>[6]</sup>对冷涡天气诱发的积云对流变化过程进行三维数值模拟, 结果表明, 积云起源于低层暖湿区域里, 并由强上升气流抬升到高层得到充分发

展。邹旭东等<sup>[7]</sup>利用 MM5 和 WRF 模式模拟辽宁一次强雷暴降水过程, 结果表明, 降水过程中来自不同地区的冷暖空气交汇和来自不同地区云团的汇合造成了此次强雷暴天气的发生。李丹等<sup>[8]</sup>模拟了一次冷涡诱发的连续雷雨过程, 结果表明上干下暖湿是冷涡局地强对流发展的关键。王培等<sup>[9]</sup>对一次东北冷涡过程进行模拟, 结果表明中尺度对流系统易发生在东北冷涡东南侧和东北侧的气旋性曲率最大处。张微等<sup>[10]</sup>利用 WRF 模式对一次大兴安岭地区增雨作业条件进行研究, 从不同尺度分析了天气条件、云宏微观条件, 完善飞机人工增雨作业指标体系。迟静等<sup>[11]</sup>模拟了吉林地区冷涡背景下极端降水天气过程, 结果表明, 中高层有干冷空气入侵, 伴随高空动量下传至低空, 加强了低空急流发展, 低空急流发展至地面附近产生超低空急流后, 加强了上升运动。任丽等<sup>[12]</sup>利用 WRF 数值模式对一次发生在东北冷涡底部的暴雨过程进行数值模拟, 两处暴雨区强降水前

大气低层均为对流不稳定,低层大气更暖湿的区域,对流不稳定更强。

开展飞机增雨作业是开发空中云水资源的一种有效手段,在保墒抗旱、森林草原防灭火、改善和保护生态环境方面发挥着重要作用。但飞机增雨作业具有多种局限性,因此作业天气条件、作业时段和作业区域的选择就显得尤为重要<sup>[12]</sup>。冷涡影响下产生的积层混合云作为一种非常有效的降水系统,加之合理的开发云水资源,将在抗旱、森林防灭火等方面起到非常重要的作用。本文所用资料有地面自动气象站观测资料、欧洲中心 ERA5 再分析资料(水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 时间间隔为 1h)、多普勒天气雷达和飞机上宏观观测记录等。对 2023 年 6 月 10~12 日在兴安盟地区开展的飞机增雨作业个例进行分析,从天气条件、作业条件等进行多尺度特征分析,对深入认识东北冷涡背景下的降水系统和人工增雨作业等方面提供一定的参考依据。

## 1 天气背景

### 1.1 前期气候概况

2023 年入春以来(3 月 1 日~6 月 7 日)兴安盟降水量明显偏少,累计降水量最大 84mm,最小 25mm。大部分地区较常年同期偏少 40%~70%。6 月 3~7 日除阿尔山岭北地区外,其他大部地区出现不同程度的气象干旱。其中,中一重旱主要分布在阿尔山南部、前旗中北部、扎旗大部、突泉中南部、中旗中南部地区。科右前旗出现干旱灾害。为缓解旱情,联合开展两架增雨飞机立体交叉作业的飞行计划,增雨飞机在高空联合作业,形成大小两架飞机上下立体交叉作业模式。

### 1.2 天气形势

利用 ERA5 再分析资料对此次过程的大尺度背景场分析表明,6 月 10~12 日,欧亚地区中高纬度环流形势为两槽一脊型,东北地区受冷涡系统影响。从温压场的配置来看高层的等压线和等温线基本重合,系统发展深厚,兴安盟上空处于冷涡中心附近,系统维持稳定少动,暖空气的强度随时间增强,冷中心北移,东北暖湿气流和西北干冷气流在东北地区产生交汇,选取兴安盟北部和南部降水大值区制作 9~12 日预报时序图,从环流系统的垂直剖面结构来看,9 日开始,整层的水汽条件有明显的转好,配合强烈的上升运动,前期降水性质有一个明显的对流性特征。11 日夜间开始,850hPa 存在低空急流,位于兴安盟中南部,有利于上述地区系统性大范围降水的产生。上述系统配置有利于冷涡影响下兴安盟地区降水天气的发生发展。

从 6 月 8~12 日的逐小时相对湿度和水汽通量变化情况来看,内蒙古东部地区水汽来源有两个。一个是来自东南部源源不断输送的水汽,另一个源于冷涡系统本身所带来的水汽,其中东南部水汽输送是此次降水过程主要水汽来源。可以看到 6 月 8~12 日关注区域,相对湿度在 70% 以上,水汽通量数值较大,水汽条件良好。

### 1.3 服务情况

6 月 5 日气象部门开展第 1 次人影联合会商,发函请求人影飞机专场作业。6 月 6 日召开抗旱气象服务视频会议,

启动气象干旱 III 级应急响应,发布天气预报信息。6 月 7 日调研指导全盟旱情、预报和人影服务等情况。6 月 8 日紧急与民航机场进行了协调,确定了飞行时间和飞行区域。晚间部署增雨飞机开展人影作业工作。6 月 10 日技术团队现场作业指导并迅速开展抗旱增雨作业。

## 2 作业条件预报

### 2.1 云模式预报

根据 CPEFS 模式预报的典型时刻云带来看,受低涡影响,7~12 日兴安盟有分布不均的云系覆盖,云系以冷暖混合云为主,云系呈逆时针旋转。7 日 20 时~9 日 20 时,云系平均移速 30~45km/h。10 日 20 时~11 日 20 时,云系移动缓慢,移速为 20~35km/h。兴安盟大部地区可降水量大于 20mm,并有一定的云水和过冷水分布,垂直累积过冷水中心达 2mm。11 日 20 时~12 日 20 时,兴安盟地区云系分布偏南,云系平均移速 35~50km/h。上述时刻云系具有一定增雨作业条件。

从典型时刻云体垂直剖面来看,影响兴安盟地区的主要云系为冷暖混合云,7 日 20 时到 9 日 20 时云底高度约 2.0km,云顶高度约 9.0km,云中有一定量的过冷水,主要位于  $0^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$  层(3.0~6.0km),含量约为 0.01~0.5g/kg。作业层风向主要为偏北风或偏东风。10 日 20 时到 11 日 20 时云系为冷暖混合结构,云顶高度整体超过 9.0km,云底高度约为 1.0~1.5km。云中过冷水主要位于  $0^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$  层(2.7~6.0km),含量约为 0.01~1.0g/kg,过冷水含量略有增加。11 日 20 时到 12 日 20 时干旱区的云系主要为冷暖混合云。云顶高度整体超过 4.0~6.0km,局地对流区超过 8.0~9.0km,云底高度约为 1.5~2.0km。云中过冷水主要位于  $0^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$  层(3.0~6.4km),含量约为 0.01~0.7g/kg。

由 6 月 8~12 日卫星云图可知,8 日 08 时冷涡云系位于内蒙古呼伦贝尔市南部地区,云系分布在东北地区大部,云层较厚,移动速度较慢,约为 35km/h,云系整体向东南方向移动,位于兴安盟地区上空云层分布较厚且均匀,以积层混合云为主。到了 6 月 12 日随着系统的东南移,其西北部有干冷空气进入,系统进入成熟阶段,云带厚度开始减弱,分布相对零散,局部云顶较高,降水趋于结束。

### 2.2 增雨落区预报

从 7~12 日各时段的增雨落区预报与降水实况图对比来看,7~8 日降水对流性质显著,降水落区的不确定性较高,7 日 20 时~8 日 02 时和 8 日 20 时~9 日 08 时的增雨落区预报与实况范围相比略有偏大。8 日 02 时~8 日 20 时和 9 日 08 时~9 日 20 时增雨落区预报与降水实况吻合度较高。10~12 日以系统性的降水为主,增雨落区预报基本与实况相符,指导意义较高。针对全盟气象干旱的严峻形势,及时进入应急状态,积极申请协调增雨力量,共发布过程预报、潜势预报、作业方案、飞行计划等共 14 期。

## 3 作业条件分析

从 8~10 日典型时刻红外云图可以看到,兴安盟大部受

到冷涡的影响,云系自东北向偏南移动,移速约 25km/h。作业区回波呈点状分布,回波东北向偏南移动。Y12 增雨飞机于 8 日 15:10、9 日 8:05 和 10 日 8:06 起飞开展增雨作业,增雨飞机针对兴安盟中北部和南部中到重度干旱区开展了增雨作业,飞机选择“几”字型和“8”字型穿飞,机上宏观记录表明:作业云系为积层混合云,云体发展深厚,水汽含量充足,云内飞行较平稳,表面过冷水含量较充沛。11~12 日典型时刻红外云图可以看到,冷涡云系稳定维持,移速约 20km/h。11 日上午作业区回波较弱,午后开始在原地发展并保持维持,移速缓慢。12 日回波主要集中在兴安盟中南部地区,向西南方向移动。Y12 增雨飞机于 11 日 7:35 和 12 日 9:08 再次对中南部干旱区进行了增雨作业,飞机选择“几”字型和“8”字型穿飞,机上宏观记录表明:作业云系发展为云层,云层较厚,水汽条件较好,在作业过程中飞机有颠簸(见表 1)。

表 1 飞机作业情况表

飞行时间	飞机机型	催化时间	催化层高度	催化层温度
6 月 10 日	新舟	18:30-19:40	3600~4800m	-6℃~-14℃
	Y12	8:23-10:09	4200~4300m	-5℃~-9℃
6 月 11 日	新舟	7:29-10:03	4000~4800m	-6℃~-14℃
	Y12	7:50-10:50	2900~4100m	-5℃~-9℃
6 月 12 日	新舟	8:59-11:23	2500~4800m	-6℃~-14℃
	Y12	9:40-11:00	3800~4000m	-5℃~-9℃

#### 4 结论

此次主要受冷涡系统影响,等压线和等温线基本重合,系统发展深厚,暖空气的强度随时间增强,冷中心北移,东北暖湿气流和西北干冷气流在东北地区产生交汇,9 日开始,整层的水汽条件有明显的转好,配合强烈的上升运动,前期降水性质有一个明显的对流性特征。上述系统配置有利于冷涡影响下兴安盟地区降水天气的发生发展。

从水汽情况来看,内蒙古东部地区水汽来源有两个,一个是来自东南部,另一个源于冷涡系统本身,其中东南部水汽输送是此次降水过程主要水汽来源,相对湿度在 70% 以上,水汽通量数值较大。

从典型时刻云带来看,受低涡影响,7~12 日有分布不均的云系覆盖,云系以冷暖混合云为主,云系呈逆时针旋转,云系平均移速 20~45km/h,大部地区可降水量大于 20mm,并有一定的云水和过冷水分布,垂直累积过冷水中心达 2mm,云系具有一定增雨作业条件。

从典型时刻云体垂直剖面来看,主要云系为冷暖混合云,云底高度约 1.0~2.0km,云顶高度约 6.0~9.0km,云中有一定量的过冷水,主要位于 0℃~20℃层(3.0~6.0km),含量约为 0.01~1.0g/kg。作业层风向主要为偏北风或偏东风。

从增雨落区预报与降水实况图对比来看,7~8 日降水对流性质显著,降水落区的不确定性较高,10~12 日以系统性的降水为主,增雨落区预报基本与实况相符,指导意义较高。

增雨飞机多次开展增雨作业,增雨飞机针对兴安盟中北部和南部中到重度干旱区开展了增雨作业,飞机选择“几”字型和“8”字型穿飞,作业云系为积层混合云,云体发展深厚,水汽含量充足,云内飞行较平稳,表面过冷水含量较充沛。

6 月 14 日旗县 0~30cm 土壤墒情普查结果显示,目前主体农区以一~二类墒为主,三类墒主要分布在科右中旗南部的局部地区。与 6 月 7 日测墒结果相比,土壤墒情明显改善,大部农区三类墒转为二类墒,二类墒转为一类墒,此次降水后我盟旱情有效缓解,6 月 12 日我盟前旗西北部和中旗南部地区外,大部地区气象干旱已解除。

抗旱增雨气象服务保障工作的成功经验,以解除旱情为导向,通力合作,为本次人工增雨作业取得圆满成功提供坚强的组织保障;科学指导,保障有力,组织精干力量,共同谋划增雨计划,科学设计飞行航线,最大限度科学利用云水资源;集约资源、齐心协力。统筹多架次飞机联合作业,集中开展地面增雨火箭力量,力求实现作业最大效果。

通过此次增雨工作,仍存在问题,人工影响天气精准指挥作业能力不足,业务保障支撑需进一步加强,部分火箭增雨装备老化,存在安全风险,业务能力仍需进一步提升,培训力度仍需加大。下一步将继续总结经验,不断提高气象服务保障水平。

#### 参考文献:

- [1] 孙力,郑秀雅,王琪.东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流系统之间的关系[J].应用气象学报,1994,5(3):297-303.
- [2] 朱宇宇,孟智勇,雷蕾,等.中国东北冷涡背景下连续发生的中尺度对流系统的组织演变特征个例分析[J].北京大学学报(自然科学版),2022,58(3):421-433.
- [3] 王涛,齐彦斌,王东,等.东北冷涡积层混合云系形成条件的个例分析[J].气象与环境学报,2010,26(5):8-11.
- [4] 耿树江,王建捷,宫福久.一次夏季东北冷涡中积云发展过程的数值模拟[J].气象科学,2006(2):149-156.
- [5] 周德平,陈宝君,宫福久,等.一次东北冷涡降水过程的数值模拟研究[J].辽宁气象,2004(2):4-5.
- [6] 耿树江,王建捷,宫福久.一次夏季东北冷涡中积云发展过程的数值模拟[J].气象科学,2006(2):149-156.
- [7] 邹旭东,杨洪斌.MM5和WRF模拟东北冷涡雷暴天气过程对比分析[J].气象与环境学报,2007(6):20-25.
- [8] 李丹,王昌双,刘伟.东北冷涡引发的局地暴雨数值模拟研究[J].气象与环境学报,2009,25(6):29-33.
- [9] 王培,沈新勇,高守亭.一次东北冷涡过程的数值模拟与降水分析[J].大气科学,2012,36(1):130-144.
- [10] 张微,李德泉,刘星光,等.冷涡前部飞机人工增雨作业条件数值模拟研究[J].沙漠与绿洲,2020,14(6):54-60.
- [11] 迟静,周玉淑,冉令坤,等.吉林一次极端降水发生发展动热力过程的数值模拟分析[J].大气科学,2021,45(6):1400-1414.
- [12] 任丽,马国忠,孙琪.一次东北冷涡暴雨过程中尺度及云物理特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(6):31-39.
- [13] 田英,吴爱萍.一次人工增雨作业效果分析[J].贵州气象,2009,33(2):35-37.