

青海省春季一次积层混合云飞机人工增雨作业个例分析

王丽霞¹ 周万福¹ 张莉燕¹ 王启花¹ 杨雪玲² 李京梅³

(1 青海省气象灾害防御技术中心, 西宁 810001; 2 西安地球环境创新研究院, 西安 710061;
3 青海省西宁市气象局, 西宁 810003)

摘要: 利用中国气象局人工影响天气中心下发的CPEFS模式产品, 结合雷达、卫星及自动站降水等观测资料, 从作业条件分析、作业实施情况以及作业效果等方面, 对2021年青海省春季一次积层混合云飞机人工增雨个例进行分析探讨。结果表明: 此次降水过程系统水汽充足, 有一定的增雨潜力, 具备开展人工增雨催化的条件; 作业区云体密实, 过冷水丰富, 催化部位位于云中上层, 催化层温度为 $-16 \sim -12$ °C, 催化区域和催化高度合理; 实施飞机播云作业后, 作业影响区云体雷达和卫星参量上均有较明显的反映, 结合人工催化前后作业影响区和对比区地面站小时降水量的变化特征, 在一定程度上说明此次飞机人工增雨作业对目标云体的发展和维持起到了促进作用, 催化播云效果较明显。

关键词: 增雨潜力, 飞机人工增雨, 效果分析, 青海

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.04.007

A Case Analysis of an Airplane Artificial Precipitation Enhancement Operation with Spring Cumulus Embedded Stratus in Qinghai Province

Wang Lixia¹, Zhou Wanfu¹, Zhang Liyan¹, Wang Qihua¹, Yang Xueling², Li Jingmei³

(1 Meteorological Disaster Prevention Technology Center in Qinghai Province, Xining 810001; 2 Xi'an Institute for Innovative Earth Environment Research, Xi'an 710061; 3 Xining Meteorological Bureau of Qinghai Province, Xining 810003)

Abstract: Using the CPEFS model products issued by the Weather Modification Center of China Meteorological Administration, combined with observation data such as radar, satellite and automatic station precipitation, a case analysis of airplane artificial precipitation enhancement operation with spring cumulus embedded stratus in Qinghai Province in 2021 is conducted from the perspectives of operation conditions, operation implementation and operation results. The results show that (1) the precipitation process system had sufficient water vapor, which had a certain potential of precipitation enhancement, and had the conditions to carry out artificial precipitation enhancement operations; (2) The operation area had dense clouds and abundant subcooled water, the catalytic site was located in the upper layer of the cloud, and the temperature of the catalytic layer was about $-16 \sim -12$ °C, thus with appropriate catalyst area and height. After the implementation of the aircraft cloud seeding operation, the impacts of the operation were clearly reflected by radar and satellite parameters. The comparison between the variation characteristics of hourly precipitation of ground stations from the operation area and those from the comparison area indicates that the aircraft artificial precipitation enhancement promoted the development and maintenance of the target cloud body to a certain extent, with obvious effect of cloud seeding.

Keywords: precipitation enhancement potential, aircraft artificial precipitation enhancement, effect analysis, Qinghai

收稿日期: 2022年5月12日; 修回日期: 2022年9月26日
第一作者: 王丽霞(1990—), Email: wanglx09@163.com
通信作者: 张莉燕(1995—), Email: 935862656@qq.com
资助信息: 国家自然科学基金项目(42165008); 中国气象局西北区域人影建设研究试验项目(RYSY201903); 青海省科技厅研究项目(2021-ZJ-745)

0 引言

青海省位于青藏高原东北部, 其东部地区是省内主要的粮食、蔬菜等农作物产区, 也是春季干旱易发区, 素有“十年九旱”之称^[1]。在全球变暖气候背景下, 该地区干旱日益频发, 严重制约了其农业和经济的发展, 是围绕青海省经济、社会发展的重大难题^[2]。实施人工增雨作业可提高该地区的云水转化效率, 增

加降水量,从而对缓解阶段性旱情、改善土壤墒情、助力春耕生产等有积极作用^[3]。

国内常见的人工增雨方式有飞机作业、地面烟炉作业和地面火箭作业,其中飞机作业适用于执行作业覆盖面积广的增雨任务。飞机增雨作业的时机、部位及催化剂播撒量的选择对人工增雨效果有着极其重要的影响,为了最大限度地发挥人工增雨作业的效能,制定飞机作业方案时需精准预判天气系统过程和降水云系(体)的增雨潜力^[4-7]。同时,科学评估人工增雨作业效果对提高播云作业水平、验证和改进催化作业理论与方法都十分重要^[7]。

国内很多学者通过多种方法对作业云体增雨潜力识别和增雨效果评估等方面进行了探讨。杜毓龙等^[4]利用飞机和雷达探测资料,总结了陕西省秋季飞机人工增雨作业层状云向降水转化的有利条件。效果检验在国内外人工影响天气工作中仍是一个技术难题,李宏宇等^[8]、崔丹等^[9]、刘伯华等^[10]、张中平等^[11]对人工增雨效果评估的探讨,为效果检验提供了参考。贺艺等^[12]利用GRAPES模式产品,结合卫星、雷达、降水等观测资料对人工增雨作业的条件、潜力、效果等进行分析,认为作业后催化区内回波强度增强显著,降水增大明显。韦增岸等^[13]结合WRF模式预报和雷达卫星等观测资料,对广西的一次人工增雨个例进行分析,认为作业后,影响云体的雷达回波明显增强,且多参数区域对比分析雷达参数和降水量的K值增加。林丹等^[14-16]结合卫星、雷达等资料,对四川盆地冬季和春季的飞机人工增雨个例进行分析,认为作业后,影响区内卫星、雷达参量及地面雨量等均有明显变化。

本文利用CPEFS(Cloud Precipitation Explicit Forecast System)模式产品,结合卫星反演产品、雷达及自动站降水等观测资料,从作业条件分析、作业实施情况以及作业效果等方面对2021年4月23日青海省一次积层混合云飞机人工增雨作业进行探讨,该工作有助于加深对同类型降水天气过程人工增雨条件的判识,以期对青海省飞机人工增雨作业方案的合理设计提供一定的技术参考。

1 资料介绍

本文选用西宁和海北的雷达资料,卫星反演产品是利用FY-2静止气象卫星探测资料和L波段探空资料,联合反演得到的一组云宏观和微观物理特征参数。作业潜力判识采用的CPEFS模式是中国气象局人工影响天气中心研发的云降水显式预报系统,该模式以WRF动力框架为基础,耦合了CAMS(Chinese Academy of

Meteorological Sciences)云微物理方案,可模拟出我国陆地区域的云宏观场、云微观场、云垂直剖面 and 降水场,其时间分辨率为1 h,空间分辨率为3 km。通过CPEFS在青海高原地区的本地化检验,结合德吉白玛等^[17]针对CPEFS模式在西藏人影服务保障中的检验分析,认为CPEFS模式对高原地区天气过程的模拟效果较佳。

2 作业条件分析

2.1 天气形势分析

2021年4月23日08:00(北京时,下同),500 hPa高空巴尔喀什湖以东低涡底部的低槽位于我国新疆,槽前西南气流强,系统水汽充足,冷涡底部有短波槽下滑,青海西部和青南地区各有一东西走向的切变线;700 hPa巴尔喀什湖以东有-20℃的闭合冷中心,低值系统影响青海地区。23日20:00,500 hPa青海东西两条切变线汇合并北抬,在青海东北部形成西北-东南走向的低槽,继续影响青海东部地区;700 hPa随着低值系统南压,低层偏东风水汽输送进一步加强。受高原地形影响,08:00冷空气分东西两路影响青海;14:00东路冷空气继续东移南压,在高原东部河谷地区形成倒灌冷空气,影响青海东部地区。综上所述,受北部冷空气和西南暖湿气流共同影响,青海大部地区出现了一次降水天气过程。

2.2 作业潜力分析

利用CPEFS模式预报的云带和垂直累积过冷水等产品,可以分析云系的发展趋势和垂直结构,从而判断目标云系是否具备人工增雨潜力。综合图1和图2可以看出,4月23日14:00—20:00,青海省海西东部、海北、西宁、海东、海南、黄南等地区有云系覆盖,云系以冷云为主,自西南向东北移动,移动速度约为30 km/h。云中过冷水主要位于-25~-10℃层(4500~7000 m),最大含量达0.3 g/kg,垂直累积过冷水最大值为0.6 mm,部分地区冰晶数浓度小于100个/L,不利于该地区降水的形成。综上所述,4月23日14:00—20:00,青海省海北、西宁、海东等地云系较为稳定,过冷水资源较为丰富,但由于冰晶数量较少,可通过播撒碘化银(AgI)烟条或焰弹的方式来增加上述区域的冰晶数浓度,从而增加降水量。

3 作业概况

作业前CLDAS(高分辨率多源土壤温湿度产品)土壤相对湿度监测显示,青海省范围内土壤相对湿度整体偏低,环青海湖和湟水谷地等地区局部土壤相对湿度为10%~40%。结合青海省东部农业区春季抗旱

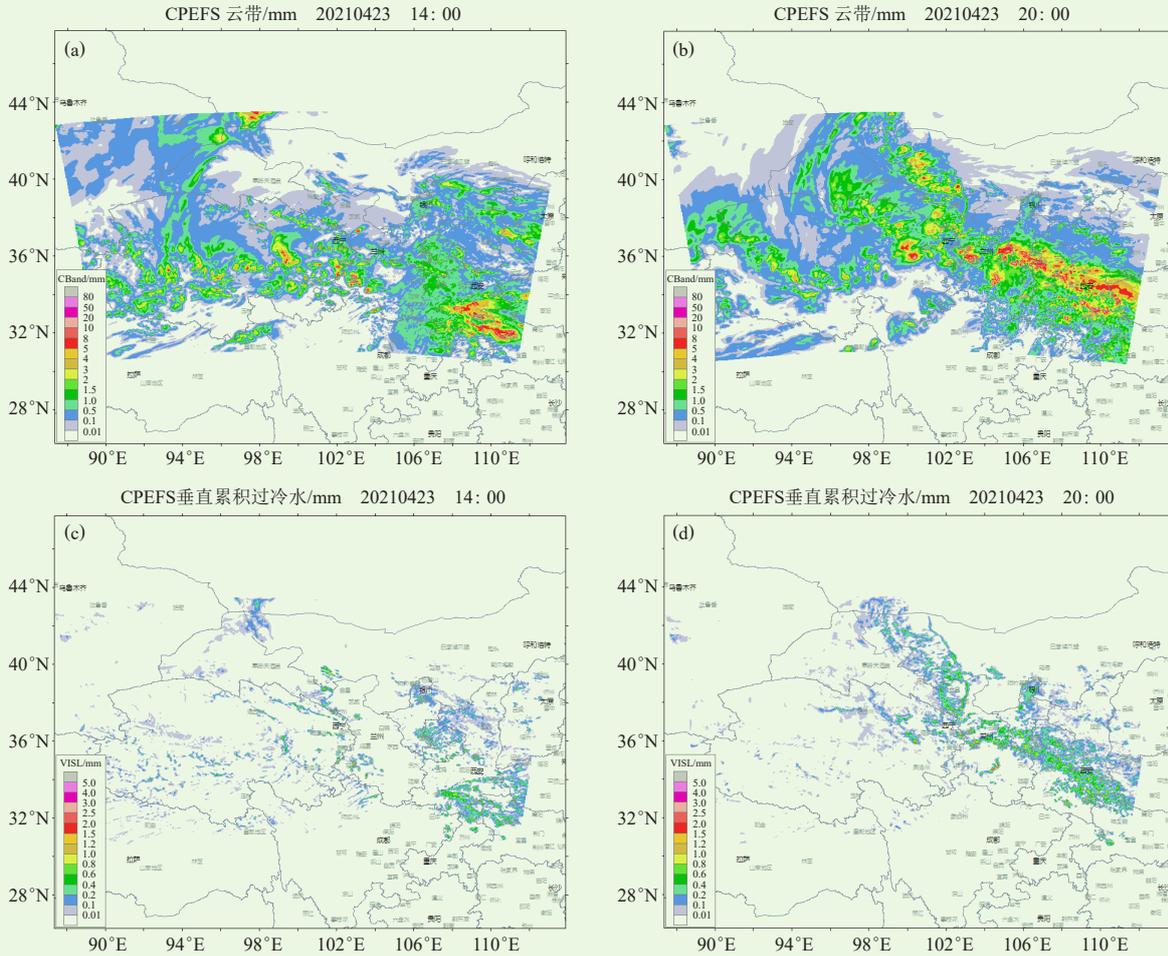


图1 2021年4月23日14: 00和20: 00云带 (a, b) 和垂直累积过冷水 (c, d) 分布

Fig. 1 Distribution of cloud belt (a, b) and vertically accumulated supercooled water (c, d) at 14:00 BT and 20:00 BT of 23 April 2021

需求, 2021年4月23日16: 27—19: 33, 青海省人工影响天气办公室组织开展飞机人工增雨作业1架次, 飞行总时长约3 h, 飞行航程1026 km, 作业催化时段为17: 03—19: 01, 耗用烟条24根, 焰弹12枚。

通过沿飞行轨迹的雷达剖面(图3)可以看出, 作业区以积层混合云为主, 回波顶高为6~9 km, 云系处于发展阶段, 催化部位位于云中上层(作业高度6.4~6.7 km), 催化层温度为-16~-12 °C, 催化部位合理。根据作业时段内雷达组合反射率和卫星反演过冷层厚度(图4)可知, 作业云系过冷层深厚, 为3~7 km, 雷达组合反射率为20~45 dBZ, 云顶高度为5~10 km, 云系以弱积层混合云为主。由于积层混合云存在“播撒—供给”机制, 在该云体中上部播撒AgI可增加冰晶数量, 而冰晶粒子在丰厚的过冷水中可通过贝吉隆过程迅速增长成大冰晶, 对下层云进行播撒, 再通过碰并过程和凝结增长过程不断长大, 促使降水的形成^[18], 故本次降水过程适合飞机人工增雨

催化。

本次飞机人工增雨作业催化分两个区域, 初始催化阶段(17: 03—17: 30)位于海晏一带的作业云系以层状云为主(图5a), 17: 43开始进入大通、湟中的作业区, 催化时段内(17: 43—19: 01)大通、湟中一带云系以积层混合云为主(云系上部层状云、下部以弱积云为主, 作业区强中心回波大于40 dBZ, 如图5b), 受高原地形的影响, 且考虑到有效的催化层高度, 本次飞机人工增雨作业催化部位均位于目标云系中上层的层状云区。

4 作业效果分析

目前, 人工影响天气业务中常用的效果检验方法包括物理检验、统计检验及数值模式检验等^[19]。因能够直观反映人工增雨作业效果, 物理检验技术在单架次人工增雨作业效果评估中广泛应用^[20]。人工增雨效果物理检验通常通过两种途径判断人工催化所产生的作用, 一种是分析对比云和催化云物理参量的变

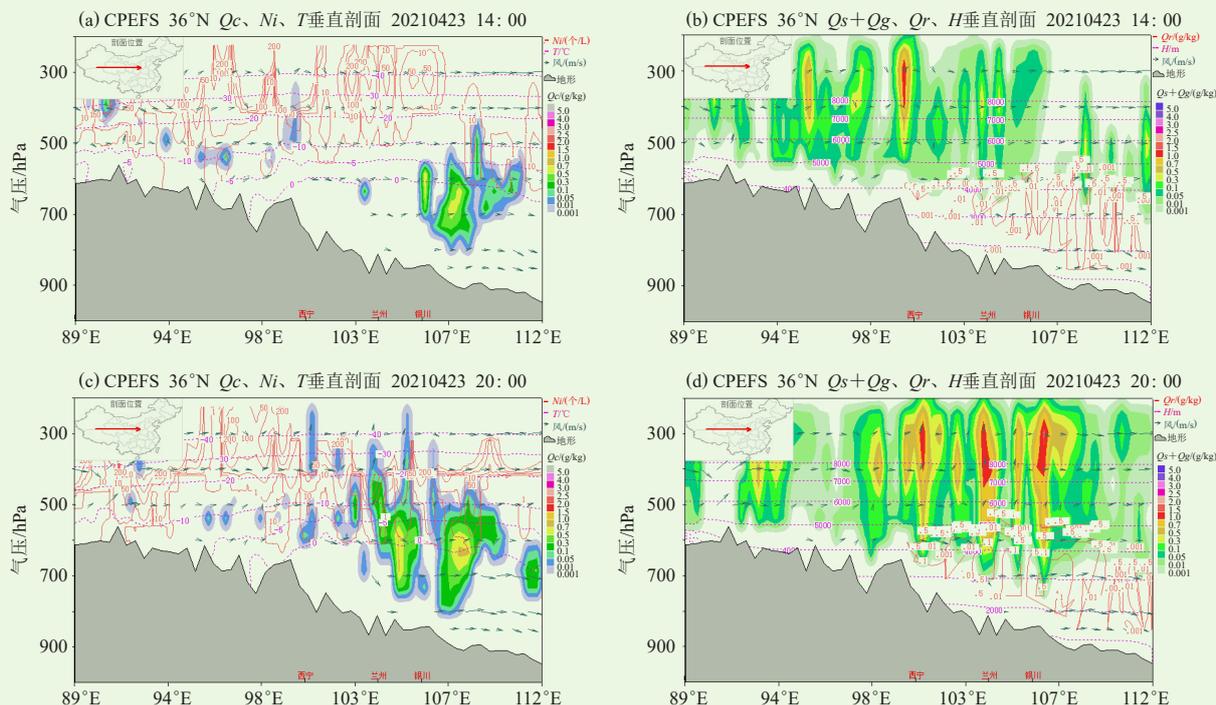


图2 2021年4月23日14: 00 (a, b)和20: 00 (c, d)云系垂直结构和作业条件图 (Qc: 云水混合比; Ni: 冰晶数浓度; T: 温度; Qs+Qg: 雪+霰混合比; Qr: 雨水混合比; H: 高度)

(a, c) Qc, Ni, T垂直剖面; (b, d) Qs+Qg, Qr, H垂直剖面

Fig. 2 Vertical structure of the cloud system and operation conditions at 14:00 BT (a, b) and 20:00 BT (c, d) of 23 April 2021 (Qc: cloud water mixing ratio; Ni: ice crystal concentration; T: temperature; Qs+Qg: snow+graupel mixture ratio; Qr: rainwater mixing ratio; H: height)

(a, c) Vertical profile of Qc, Ni, and T; (b, d) Vertical profile of Qs+Qg, Qr, and H

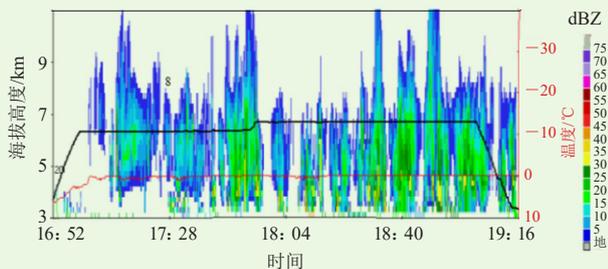


图3 2021年4月23日沿飞行轨迹的雷达剖面(填色)图
Fig. 3 Radar profile (colored) along the flight path on 23 April 2021

化和差异; 另一种是分析催化作业前后物理参数的变化^[21]。利用物理检验定性探讨人工催化的影响, 可为人工增雨效果评估提供一个物理依据, 从而为催化效果量化检验的结论提供佐证, 有利于人工增雨作业方案设计的改进^[22]。

2021年4月23日青海省飞机人工增雨作业个例分两个催化区域, 为了便于分析本次飞机人工增雨作业对具有较好催化条件的积层混合云的影响效果, 本文作业效果分析部分主要针对位于大通—湟中一带的积层混合云作业区。选择与大通—湟中作业区受同一天

气系统影响的、位于作业区及影响区上风方向的、与作业区同等面积和地形的区域作为对比区(图4), 结合雷达、卫星和地面降水资料, 分析作业前后作业区和对比区雷达、卫星参量及区域内站点降水量的时间序列变化特征。

4.1 雷达参量分析

研究表明, 作业后1 h内云中各相态粒子的浓度、尺寸等因催化作业产生的变化明显, 增雨效果可持续3 h^[23-24]。为了更加客观、直接地反映此次飞机人工增雨作业的效果, 本文选取反映云体发展强弱程度的回波强度和组合反射率, 以及反映空中含水量的大小垂直累积液态含水量(VIL), 对比分析作业前后催化影响区和对比区雷达回波强度、组合反射率及垂直累积液态水含量等参量的变化(图6), 可以看出: 催化影响区雷达回波强度和组合反射率在作业前至作业初始阶段均先增大后减小, 催化1 h后上述两个参量呈逐渐增大趋势, 直至催化后3 h内, 最大回波强度维持在45 dBZ左右, 平均组合反射率则升至30.6 dBZ; 反观对比区, 在16: 00—22: 00, 雷达回波和组合反射率都呈现出先增大后减小的变化特征, 这可能是低层云

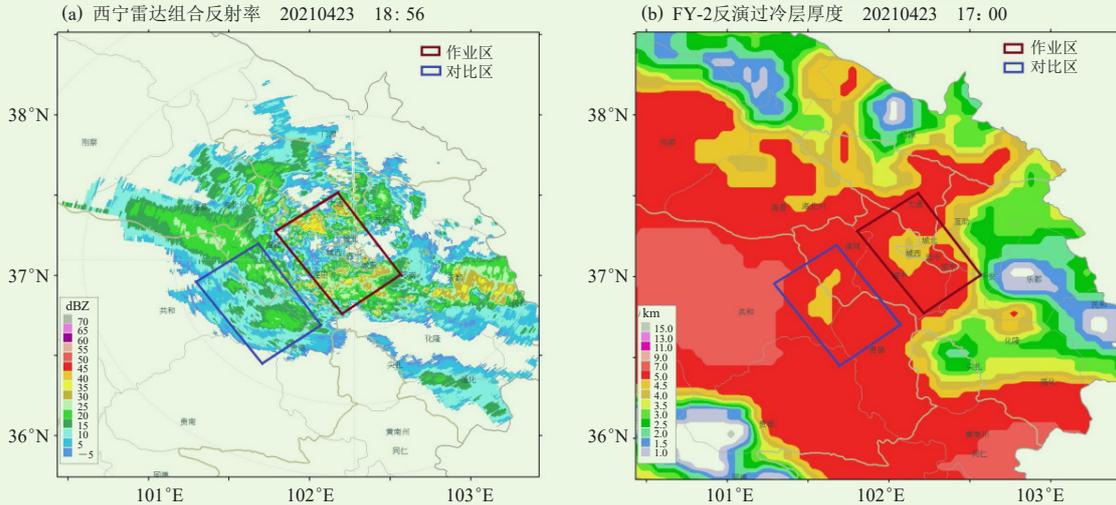


图4 2021年4月23日作业时段内作业区和对比区雷达组合反射率 (a) 和卫星反演过冷层厚度 (b)

Fig. 4 Radar combined reflectivity (a) and supercooled layer thickness retrieved by satellite (b) of operation area and comparison area during the operation period on 23 April 2021

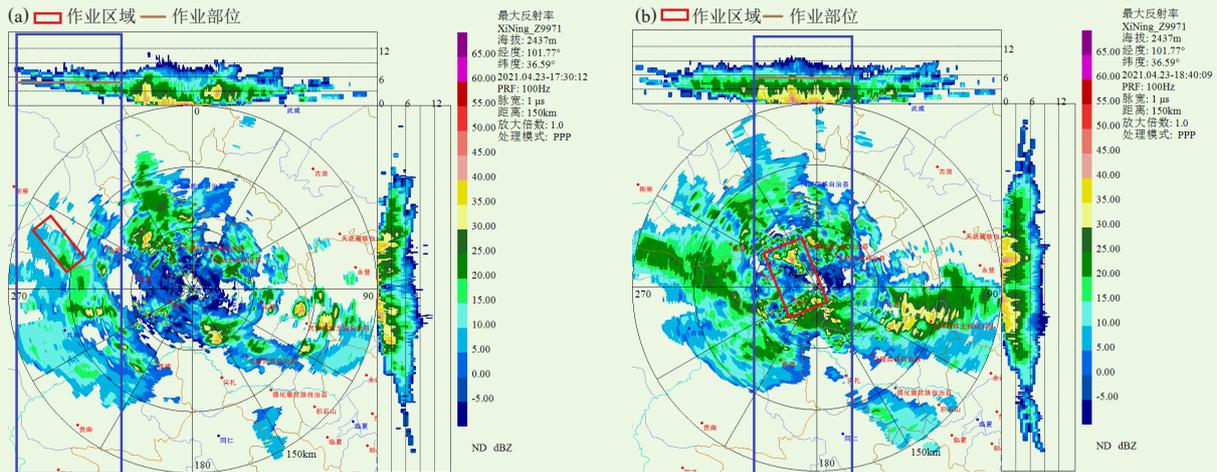


图5 2021年4月23日17: 30 (a)和18: 40 (b) 雷达最大反射率剖面

Fig. 5 Profile of maximum radar reflectivity at 17:30 BT (a) and 18:40 BT (b) of 23 April 2021

体逐渐减弱消散造成的；从最大回波强度和组合反射率来看，整个过程中催化影响区最大回波强度基本为40~45 dBZ，最大组合反射率为50 dBZ，并在催化结束后2 h内始终维持；对比区最大回波强度和最大组合反射率在18: 00前显著增大，19: 00后明显减小。另外，催化开始前目标区云体平均垂直累积液态水含量呈明显的减小趋势，催化1 h后开始呈波动增大，而催化前对比区云体平均垂直累积液态水含量高于催化作业区，此后呈波动减小，催化结束后3 h内催化作业区内云体平均垂直累积液态水含量明显大于对比区，也可从一定程度上反映出催化播撒有利于云体的发展和维持。

4.2 卫星参量分析

对催化云体而言，是否存在过冷水是判断其是否

具备增雨作业潜力的一个关键因素，而云中过冷水含量与过冷层厚度存在正相关关系，过冷层厚度越大，云中过冷水含量越大^[25]。本文选取用于判别冷暖云垂直结构配置的过冷层厚度和表征云系发展演变趋势及程度的云顶高度两个卫星参量进行分析。

比较飞机人工增雨催化播撒前后作业区和对比区卫星过冷层厚度和云顶高度变化(图7)发现：催化开始前对比区云顶高度比作业区高，且过冷层厚度比作业区大；17: 00开始作业后，催化作业区平均云顶高度由作业前的4.5 km发展至8.5 km，而对比区平均云顶高度增幅较小，由7.5 km增加至8.7 km；19: 00作业结束后，作业区作业前后平均过冷层厚度的增大较对比区明显，最大过冷层厚度和最大云顶高度与对比区云体相同，从一定程度上可以说明催化剂的播撒促进

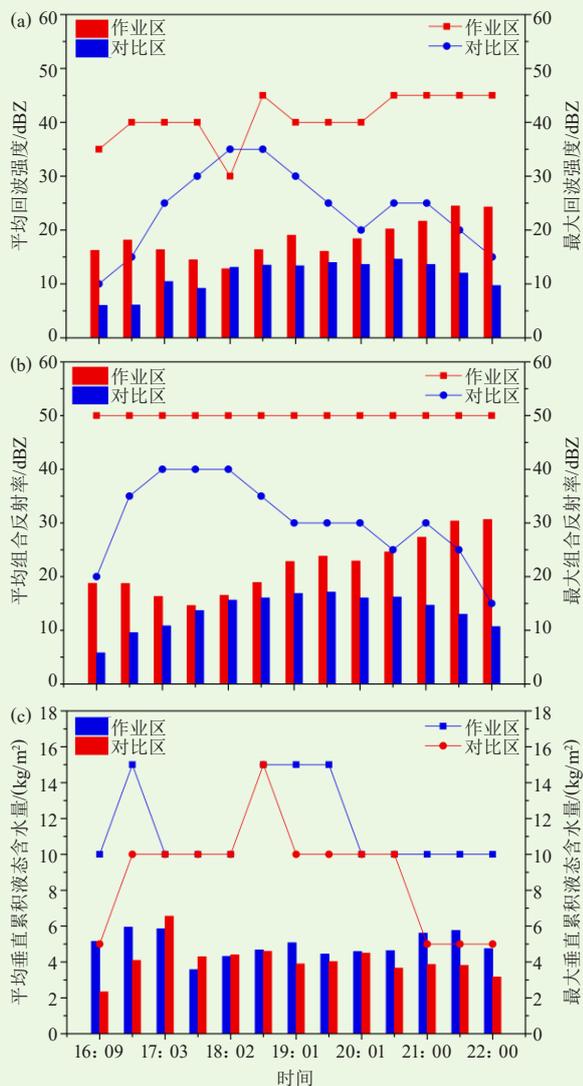


图6 作业区和对比区雷达回波强度 (a)、组合反射率 (b) 和垂直累积液态含水量 (c) 变化

Fig. 6 Variation of radar echo intensity (a), combined reflectivity (b) and vertically cumulative liquid water content (c) in operation area and comparison area

了作业区云体的发展。

4.3 雨量分析

对飞机作业影响区和对比区内自动雨量站的1 h 降水资料进行分析 (图8): 作业前作业区及影响区内仅个别站点出现降水, 随着催化作业的进行, 作业影响区各站点陆续出现降水, 且大部分站点降水有持续增大趋势, 作业结束后2~3 h降水达到最大, 其中西宁、大通、平安的最大小时降水量分别达到7.6、5.8、3.9 mm/h; 17: 00对比区1个站点出现降水, 随后区域内的3个站点陆续出现降水且降水有增大趋势, 最大降水出现在22: 00湟源站。总体而言, 在自然降水和人工增雨作业的共同作用下, 作业后影响区各站点降

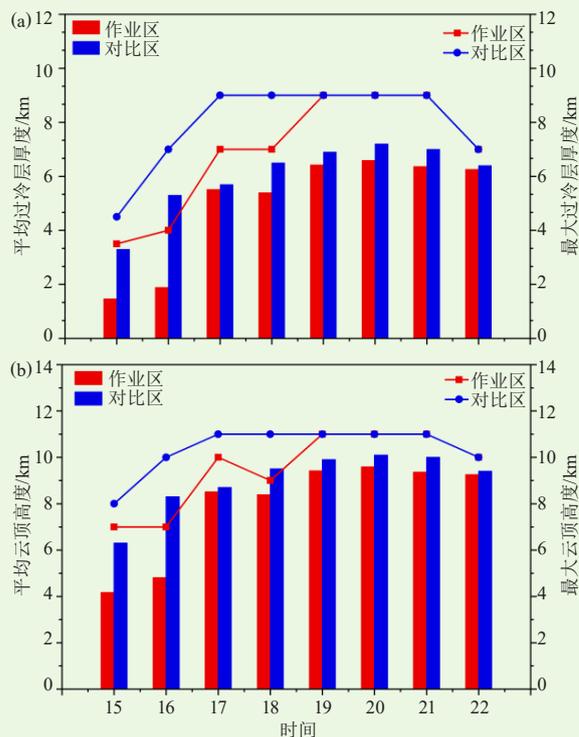


图7 作业区和对比区卫星反演过冷层厚度 (a) 和云顶高度 (b) 变化

Fig. 7 Variation of supercooled layer thickness (a) and cloud top height (b) retrieved by satellite in operation area and comparison area

水明显增大, 对比区降水也有一定程度的增大, 但增幅比作业区小, 且作业影响区的最大小时降水量明显大于对比区。

综上所述, 通过对大通—湟中一带作业区和对比区催化开始至催化结束后3 h的雷达和卫星参量的变化特征分析, 结合人工增雨催化前后作业影响区和对比区地面站点小时降水变化特征, 可以直观地说明此次飞机人工增雨催化对目标云体的发展和维持起到了促进作用。

5 结论

利用中国气象局人工影响天气中心下发的CPEFS模式产品, 结合雷达、卫星反演产品以及自动站降水等观测资料, 从作业条件分析、作业实施情况以及作业效果等方面, 对2021年青海省春季一次积层混合云飞机人工增雨个例进行分析探讨, 结论如下。

1) 受北部冷空气和西南暖湿气流共同影响, 2021年4月23日青海省大部地区出现了一次降水天气过程, 系统水汽充足, 积层混合云厚密且范围广, 但冰晶数浓度较小, 适合开展人工增雨作业。

2) 根据飞机作业时云系发展的实况, 结合雷达和卫星监测资料, 催化部位位于云中上层 (作业高度

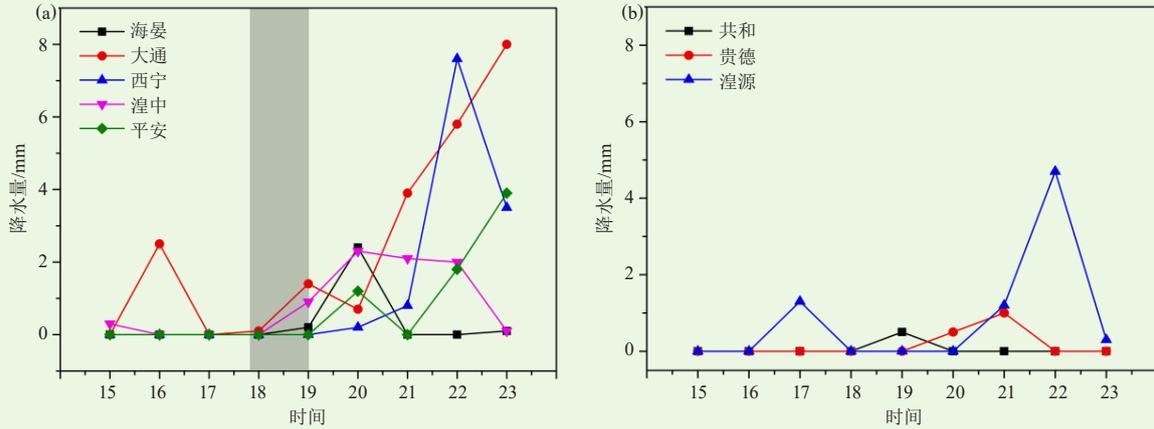


图8 催化前后作业区 (a) 和对比如 (b) 地面站点小时降水变化图 (灰色阴影: 催化作业时段)

Fig. 8 Hourly precipitation variation at ground stations before and after catalysis at operation area (a) and comparison area (b), respectively (gray shadow: the catalysis operation period)

6.4~6.7 km), 催化层温度约为 $-16\sim-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, 作业区云体密实, 过冷水丰富, 催化区域和催化高度合理。

3) 此次飞机人工增雨作业后, 作业影响云体在回波强度、组合反射率、垂直累积液态含水量等雷达参量以及云顶高度、过冷层厚度等卫星参量上均有明显的反映, 结合人工增雨催化前后作业影响区和对比如地面站点小时降水变化特征, 在一定程度上说明此次飞机人工增雨作业效果较为显著, 对目标云体的发展和维持起到了促进作用。

本文仅对青海高原地区春季一次积层混合云降水天气过程期间人工增雨目标云体是否具备增雨潜力进行分析, 并根据实施飞机人工增雨催化前后卫星、雷达等参量及降水量的变化初步探讨本次飞机人工增雨的有效性, 所得结论是否具备普适性, 还需结合机载探测资料对催化云体的微物理参量变化特征进行深入探析。

参考文献

[1] 姚瑶, 张鑫, 马全, 等. 青海省东部农业区作物生长期不同气象干旱指标应用研究. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 177-184.
 [2] 王丽莉. 青海省东部干旱风险及对春小麦种植的影响. 南京信息工程大学, 2017.
 [3] 喻乙耽, 许弋, 李枚曼, 等. 贵州省春季一次飞机人工增雨作业个例分析. 科技风, 2021, (33): 154-156.
 [4] 杜毓龙, 雷崇典, 陈保国. 陕西省飞机增雨作业典型天气个例分析. 气象科技, 2005, 33(5): 456-459.
 [5] 刘艳华, 周毓荃, 黄毅梅, 等. 一次冷锋降水云系结构和人工增雨条件模拟分析. 气象与环境科学, 2019, 42(1): 60-72.
 [6] 王以琳, 刘文, 王广河, 等. 冷云人工增雨催化区的探空依据. 气象

学报, 2002, 60(1): 116-121.
 [7] 杨敏, 鲍向东, 马鑫鑫, 等. 2010年3月14日河南省飞机增雨作业效果分析. 气象与环境科学, 2012, 35(增刊): 1-6.
 [8] 李宏宇, 嵇磊, 周嵬, 等. 北京地区人工增雨效果和防雹经济效益评估. 高原气象, 2014, 33(4): 1119-1130.
 [9] 崔丹, 黄彦彬, 肖辉, 等. 多普勒雷达数据在海南省人工增雨效果评估中的应用. 大气科学学报, 2012, 35(1): 87-94.
 [10] 刘伯华, 张鑫, 周鹏, 等. 几种气象资料在人工增雨效果评估中的应用研究. 中国环境管理干部学院学报, 2018, 28(4): 40-43.
 [11] 张中平, 钱霞荣, 叶祥玉, 等. 库区蓄水型人工增雨效果评估及其应用. 热带气象学报, 2007, 23(2): 205-208.
 [12] 贺艺, 许弋, 文继芬, 等. 贵州省2018年5月3日飞机增雨作业个例分析. 中低纬山地气象, 2019, 43(5): 48-53.
 [13] 韦增岸, 张正国, 程鹏, 等. 广西一次飞机增雨过程个例分析. 气象研究与应用, 2019, 40(3): 90-93, 116.
 [14] 林丹, 王维佳. 一次飞机增雨作业的云参数变化响应分析. 高原山地气象研究, 2015, 35(1): 67-73.
 [15] 林丹, 耿蔚. 四川盆地南部一次冬季飞机增雨作业个例分析. 高原山地气象研究, 2016, 36(2): 82-87.
 [16] 林丹. 四川省春季一次飞机增雨作业个例分析. 成都信息工程大学学报, 2017, 32(2): 208-213.
 [17] 德吉白玛, 益西卓玛, 阿旺白姆. CPEFS模式产品在西藏一次人影服务保障过程中的检验. 西藏科技, 2021, (9): 59-61.
 [18] 林磊, 姚展予. 华北地区一次积层混合云降水的数值模拟研究. 气象, 2011, 37(12): 1473-1480.
 [19] 李大山, 章澄昌, 许焕斌, 等. 人工影响天气现状与展望. 北京: 气象出版社, 2002.
 [20] 张元, 刘建西, 刘晓璐, 等. 2013年四川省飞机增雨作业典型个例分析. 成都信息工程大学学报, 2015, 30(2): 192-198.
 [21] 刘晴, 姚展予. 飞机增雨作业物理检验方法探究及个例分析. 气象, 2013, 39(10): 1359-1368.
 [22] 张中波, 仇财兴, 唐林. 多普勒天气雷达产品在人工增雨效果检验中的应用. 气象科技, 2011, 39(6): 703-708.
 [23] 中国气象局科技发展司. 人工影响天气岗位培训教材. 北京: 气象出版社, 2003.
 [24] 周亦凌, 姚展予. 一次积层混合云增雨作业天气条件分析和雷达回波效果检验. 气象与环境科学, 2017, 40(1): 11-20.
 [25] 刘健, 于勇, 蒋彤, 等. 吉林省层状云中过冷水含量分布特征及人工增雨潜力研究. 辽宁气象, 2004, 20(4): 29-30.