

樊 鹏 / 主 编

余 兴 / 副主编

陕甘宁人工增雨技术 开发研究



气象出版社

陕甘宁人工增雨 技术开发研究

樊 鹏 主 编
余 兴 副主编

气象出版社

内容简介

本书收录了国家科技部“西部开发科技行动”重点攻关计划中《黄河中游(陕甘宁)干旱半干旱地区高效人工增雨(雪)技术开发与示范》项目中的研究论文共计 57 篇,分为五大部分:一、云降水探测技术和催化技术;二、云降水数值模拟;三、计算机及业务技术系统;四、云水资源研究;五、降水天气气候研究。

本书资料翔实、新颖,既有观测结果,又有理论分析,可供气象、环保、农林和防灾减灾工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

陕甘宁人工增雨技术开发研究/樊鹏 主编.

——北京:气象出版社,2003.12

ISBN 7-5029-3727-7

I. 陕… II. 樊… III. ①人工降水-研究-西北地区-文集 ②技术研究 IV. P481-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 126286 号

Shan Gan Ning Rengong Zengyu Jishu Kaifa Yanjiu

陕甘宁人工增雨技术开发研究

樊 鹏 主编 余 兴 副主编

责任编辑:李太宇 袁信轩 终审:周诗健

封面设计:张建永 责任校对 王 磊

气象出版社 出版

(北京市海淀区中关村南大街 46 号 邮编:100081)

网址:<http://cmp.cma.gov.cn> E-mail:ams@cma.gov.cn

电话:68406262

北京市金瀑印刷有限责任公司印刷

新华书店总店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

开本:787×1092 1/16 印张:22.25 字数:570 千字

2003 年 12 月第一版 2003 年 12 月第一次印刷

ISBN 7-5029-3727-7/P·1318

定价:55.00 元

陕甘宁人工增雨技术开发研究

编委会

主 任：张积耀

副 主 任：崔讲学 陈洪田

编 委 （按姓氏笔画为序）

牛生杰 刘贵华 刘建军

李春虎 李候喜 陈保国

陈争旗 陈晓光 陈添宇

余 兴 雷恒池 樊 鹏

主 编：樊 鹏

副 主 编：余 兴

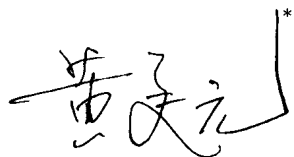
序 言

呼风唤雨是神话中的传说,更是人类认识自然、改造自然的美好期盼。发生在地球大气中的云雨自然现象,有其内在的自然演变规律和自我调控机制。通过对降水系统演变过程的认识,寻找影响降水多寡的关键过程和敏感环节,人为施加一定的影响,使得降水系统演变向着人们期待的方向发展,趋利避害,向人类和自然协调发展的目标迈进一步,是气象工作者,特别是从事人工影响天气工作者的主要科研目标。

我国人工影响天气工作是在老一辈气象科学家顾震潮、程纯枢等先生带领下,以解决国家工农业发展过程中对水的需求,抗旱减灾为目的而开展起来的。经过几代人的努力,取得了一定的进展,人工影响天气已成为各级政府部门抗旱减灾的主要手段之一。然而,由于成云致雨过程的复杂性,特别是降水的多样性和局地性,使得人工增雨工作具有非常明显的地域特征。只有对当地降水系统有清楚的了解,才可能有针对性地进行人工催化作业,使得人工影响天气工作更具科学性,更为有效。

我非常欣喜地看到,陕、甘、宁三省区人工影响天气工作者在科技部《黄河中游(陕甘宁)干旱半干旱地区高效人工增雨(雪)技术开发与示范》项目的支持下,围绕着高效人工增雨技术这一主题,进行了卓有成效的科技攻关,对影响该地区的各种降水云系应用气象卫星、气象雷达、飞机、遥感探测等装备进行了综合探测研究,初步揭示了该地区云和降水形成物理过程的独特性,为该地区有效地进行抗旱增雨工作起到了推动作用,为国家西部大开发战略的顺利实施,解决西北地区干旱缺水、开发空中水资源,从理论和技术上比以前进了一步。本书所收录的论文就是他们近年来科研工作的结晶,对其它地区开展有效的人工增雨工作有一定的借鉴意义。

认识无止境,人工增雨工作任重道远。衷心希望人工影响天气的科研工作者发扬唯实求真的科学精神,努力攻关,使得我国人工增雨工作的科学性、有效性进一步提高,为国民经济发展服务,为人类和自然的协调发展尽一份力量。



2003年12月于北京

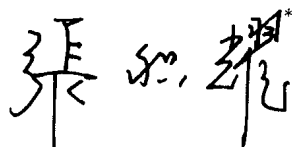
* 黄美元,中国科学院大气物理研究所研究员

前 言

地处黄河中游的陕西、甘肃、宁夏为典型的干旱半干旱地区,干旱半干旱面积达 80%以上,干旱频繁发生,程度严重,持续期长,黄河断流,水资源短缺状况十分严重。水已成为制约三省区社会经济发展乃至部分地区人畜生存的关键制约因素。为了缓解陕、甘、宁地区水资源短缺状况,运用现代人工增雨技术,开发利用空中水资源,更好地服务于西部大开发和经济发展,经充分论证,国家科技部于 2001 年将《黄河中游(陕甘宁)干旱半干旱地区高效人工增雨(雪)技术开发与示范》项目列入“西部开发科技行动”重点攻关计划,依托科技部专项经费支持和地方各级政府对人工增雨作业的投入,组织多部门、多学科专家协同攻关,重点解决人工增雨中存在的一些科学及技术问题,提高人工影响天气的技术水平和增雨效果,增加人工增雨量在水资源管理中的贡献率。

为了确保课题高起点高质量地按期完成,成立了课题领导小组,下设协调组和技术组,负责协调、组织实施和技术攻关。协调组由各协作单位主要领导人组成,技术组由各分课题负责人组成,聘请中国科学院大气物理研究所黄美元研究员和中国气象科学研究院游来光研究员为课题顾问,聘请中国气象科学研究院陈万奎研究员为飞机增雨外场试验研究总顾问。该课题由陕西省人工影响天气中心承担,中国科学院大气物理研究所、南京气象学院、宁夏回族自治区气象科学研究所、甘肃省人工影响天气办公室、陕西省气象科学研究所、陕西省气象台等单位参加。课题分 4 个分课题、11 个专题实施,对每个分课题提出具体的研究内容、考核指标,落实责任。课题实施期间开展了人工增雨试验的综合探测,在飞机上安装微波辐射计、含水量仪、粒子测量系统(PMS)、全球定位系统(GPS)、空地传输系统,地面配备二台双波长微波辐射计、天气雷达、气象卫星、地面自动气象站、加密探空仪等,较大幅度地提高了对目标区云和降水及其催化效应探测的时空分辨率和信息获取能力。还开展了选择作业对象(天气、云体、部位、时机)、云水资源、催化技术方法、增雨新技术、集成优化系统、效果检验等科学问题的专题研究。该课题研究中始终坚持边开发、边应用的原则,把研究成果及时应用于人工增雨作业中,明显提高了作业效果。本书汇集了近 3 年来课题研究成果,内容不乏新颖性和实用性。由于时间紧、资料量大,书中难免疏漏,欢迎读者予以指正。

课题领导小组组长



2003 年 11 月 8 日

* 张积耀,陕西省科技厅副厅长

目 录

序言 前言

第一部分 云降水探测技术和催化技术

2002年秋季陕北地区一次锋面云系综合探测分析	
..... 陈保国 樊 鹏 雷恒池 雷崇典 郭 强 何 军(1)	
层状云降水中小尺度系统的微物理结构观测研究	牛生杰 孙照渤 安夏兰(8)
液态二氧化碳播云物理效应的观测研究	樊 鹏 陈保国 雷恒池(16)
西北地区东部秋季层状云微物理结构分析	
..... 李照荣 杨兴国 庞朝云 乔艳君 薛邦贵(23)	
兰州地区秋季层状云垂直微物理特征分析	李照荣 李荣庆 李宝梓(30)
宁夏层状云降水潜力及其宏、微观特征	
..... 刘建军 牛生杰 杨有林 赵维忠 翟 涛 闫 蓉(38)	
春季冷锋天气过程层状云微物理结构个例分析	
..... 李照荣 李荣庆 陈添宇 李宝梓 杨增梓 庞朝云(43)	
秋季冷云结构及人工增雨可播性区的评估	
..... 李照荣 陈添宇 杨珍贵 孙旭映(50)	
甘肃省秋季层状云冰雪晶粒子特征个例分析	
..... 李照荣 李宝梓 庞朝云 杨增梓(56)	
一次降水过程空中降水粒子特征分析	
..... 何 军 樊 鹏 陈保国 郭 强 陈万奎 严采繁(60)	
飞机人工增雨空地传输网络系统	
..... 樊 鹏 陈保国 郭 强 何 军 黄 兴 党国营(66)	
液态二氧化碳(LC)播撒设备研制与播撒试验研究	
..... 陈保国 陈争旗 樊 鹏 何 军(71)	
机载液氮播撒装置研制报告	
..... 杨瑞鸿(82)	
一种新的云物理综合探测航线的设计	陈保国 郭 强 陈争旗 栗 珂(85)
甘肃中部飞机人工增雨作业的雷达回波特征	付双喜 刘世祥 何金梅(89)
层状云云顶温度及冰雪晶粒子增长的雷达回波分析	陈保国 栗 珂 樊 鹏(94)
陕西省关中层状云降雨雷达回波特征	李金辉 陈保国 罗俊颀(99)
陕西洛川对流云雷达回波特征分析	岳治国 樊 鹏 雷恒池 吴玉霞(104)
陕甘地区春季降水云特征分析	雷恒池 吴玉霞 樊 鹏(109)
关中、延安适宜人工增雨的时段及层状云雷达回波特征	

.....	李金辉	陈保国	罗俊颖	(117)
陕西春季层状云降水雨滴谱部分特征				
.....	罗俊颖	樊 鹏	李金辉	孙智辉
	严采繁	陈万奎	(123)	
陕西 2002 年飞机人工增雨效果统计检验	贾 玲	陈争旗	余 兴	郭 强
	(128)			
机载 GPS 系统温度探测仪测量精度分析	郭 强	陈保国	栗 珂	贾 玲
	(134)			
用地基微波辐射计探测空中云水量	梁 谷	樊 鹏	李 燕	雷恒池
	(139)			
一次机载微波辐射计云中含水量的探测				
.....	梁 谷	樊 鹏	李 燕	雷恒池
	张晓庆	(146)		

第二部分 云降水数值模拟

飞机增雨 NOAA 卫星资料播云物理效应分析及有效性模拟研究				
.....	余 兴	戴 进	徐小红	樊 鹏
	陈争旗	段昌辉	王 勇	(154)
浅论层状云中飞机人工增雨播云间距	余 兴	戴 进	(166)	
甘肃省春末夏初降水性层状云降水微物理特征数值分析				
.....	李宝梓	王劲松	王 璘	(176)
MM5 中尺度模式及其微物理过程	戴 进	余 兴	岳治国	(183)
飞机增雨不同催化剂、核化率、播撒速率的数值试验	徐小红	余 兴	(188)	
液态二氧化碳催化增雨试验个例的数值模拟				
.....	肖 辉	何宇翔	陈争旗	房 彬
	孙海燕	(194)		
过冷层状云中飞机播云有效区域的模拟研究	余 兴	戴 进	(202)	
过冷层状云中增雨播云有效区域的数值试验	余 兴	戴 进	(213)	
陕西洛川地区对流云人工增雨数值试验研究				
.....	郭学良	雷恒池	樊 鹏	余 兴
	岳治国	(222)		
MM5 中新显式云物理方案的数值模拟研究	雷恒池	赵 震	(229)	
洛川对流性降水过程及其人工催化的数值模拟				
.....	胡朝霞	雷恒池	郭学良	岳治国
	吴玉霞	(238)		
MM5 中一种新的显式云物理方案的建立	赵 震	雷恒池	(246)	
冰雪晶含水量和雪强计算公式研究	陈万奎	雷恒池	严采繁	(257)
雨滴落速表达式的比较研究	严采繁	樊 鹏	陈万奎	(264)

第三部分 计算机及业务技术系统

人工增雨(雪)作业技术系统设计方法				
.....	刘贵华	岳治国	罗俊颖	屈铁木
	谢 军	李 燕	王 召	余靖坤
	(270)			
数据库技术在陕西人工影响天气业务中的综合应用				
.....	罗俊颖	刘贵华	李 燕	岳治国
	(275)			
基于 B/S 模式的陕西省人工影响天气网络信息管理系统				
.....	罗俊颖	刘贵华	李 燕	岳治国
	屈铁木	(281)		

第四部分 云水资源研究

西北地区水汽时空分布特征.....	李照荣	陈添宇	庞朝云	杨增梓(285)
陕西夏季不同区域层状云系水分循环研究.....	陈保国	栗珂	何军	郭强(290)
甘肃省河东地区空中水汽资源初步分析.....	俞亚勋	陈添宇	赵建华	(296)
宁夏三类降水云的时空分布及环流特征分析.....	陈豫英	李艳春		(304)
宁夏对流云降水资源状况及分布规律				
.....	杨有林	牛生杰	刘建军	翟涛 赵维忠 闫蓉(311)

第五部分 降水天气气候研究

陕西省春秋季节一般性降水天气系统及飞机人工增雨作业区域选择				
.....	陈争旗	许新田	宁志谦	贾玲(316)
陕西降水天气气候特征分析.....	梁生俊	王建鹏	赵荣	刘方(322)
甘肃河东地区降水特征及天气系统分型	孙旭映	王劲松	王璘	(327)
甘肃省飞机人工增雨环流分型及天气特点.....	李宗义	庞朝云		(331)
陕西省 2002~2003 年飞机增雨作业典型天气个例分析	雷崇典	陈保国		(337)

第一部分 云降水探测技术和催化技术

2002年秋季陕北地区一次锋面云系综合探测分析

陈保国¹⁾ 樊 鹏¹⁾ 雷恒池³⁾ 雷崇典²⁾ 郭 强¹⁾ 何 军¹⁾

1) 陕西省人工影响天气中心, 西安 710015 2) 延安市气象台, 延安 716000

3) 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要

使用载有粒子测量系统(PMS)、卫星全球定位系统(GPS)的飞机对陕北地区 2002 年 9 月 13 日一次降水性层状云系进行了有设计的催化、探测飞行。获取了云微物理背景值和影响值,对比分析发现:催化影响区内小冰晶数量产生了量级上的增加,雷达 RHI 融化层上出现的局部融化层凸起可能是液态二氧化碳(LC)催化后过冷云水消耗释放的融解潜热导致融化层局部升温上抬形成。

关键词 陕北 锋面云系 综合探测 效果分析

1 引言

陕北、渭北地区属于黄土高原沟壑区。长期以来,由于气候自然变迁和人类活动的共同影响,地表植被长期遭受破坏,水土流失严重,地表、地下水资源短缺,极大地制约着该地区农、牧、林业发展,影响西部大开发战略的实施,亟待寻求解决办法。大量室内实验、理论研究和外场试验证明,采用科学手段,实施人工增雨是开发空中水资源,解决干旱问题的途径之一。国家重点攻关项目《黄河中游(陕甘宁)干旱、半干旱地区高效人工增雨(雪)技术开发与示范》项目组,重点开展了对陕北、渭北地区降水性层状云系的微物理结构特征探测及物理评估研究工作。本文根据 2002 年 9 月 13 日第一架次探测飞行所取得的云微物理背景值和影响值资料,分析了对播撒液态二氧化碳(LC)云微物理结构的物理响应、雷达回波、地面降水等的变化。

2 天气形势

2002 年 9 月 12 日 500 hPa 高空图上,乌拉尔山到贝加尔湖维持一欧亚大脊,河套处于东

• 资助课题:国家科技部“西部开发科技行动”重大攻关项目(2001BA901A41)。

北大槽后部中纬度的平直气流之中,我国东南大部分地区受副高控制,受其影响,青藏高原东部上空盛行偏南风,把孟加拉湾水汽带入河套区上空,与副高外围的偏南气流形成两股水汽输送带,在河套地区上空形成辐合。由于冷空气活动偏北,中纬度平直西风气流有较弱小波动东移影响,在我国北部大部分地方形成稳定的降水天气。9月12日20时至13日20时的500 hPa高度上(图1)可以看出,副高有一次明显的西伸东退的过程,造成北侧的冷空气随西西北气流中的短波槽东移南压,迅速下滑进入河套区上空,并与南侧偏南风暖湿气流交汇,在河套区中部上空形成大面积降水云区(图2)。延安站13日08时 $T-T_d=0.7^{\circ}\text{C}$,对应在卫星红外云图上(图3 10时、12时、14时、16时)可以看到,在作业区上空对应有深厚降水云团。

在700 hPa高度上,9月12日~13日河套底部维持有偏南气流的水汽输送,13日08时延安站上空有一中尺度切变与500 hPa槽切变配合,是降水的影响系统。再是700 hPa至500 hPa形成相当的湿层,成为较有利降水的大气层结。分析得出长波槽云系多为层云,具有一定的含水量。但在地面图上(图2)由于受冷高压控制,云层总体较薄、云带较窄、移速较快,这种天气形势,从预报角度来讲是不利于产生大范围中雨以上的降水天气。

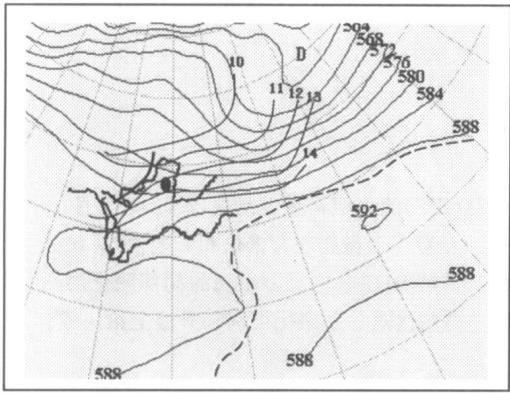


图1 13日08时500 hPa形势
(虚线为13日20时588 dagpm线位置
与短波槽的配置)

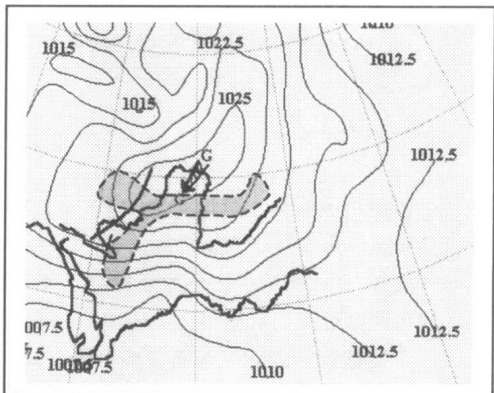


图2 12日14时地面形势
(箭头所指为13日14时高压移动位置
虚线区13日08时 $T-T_d<1^{\circ}\text{C}$)

3 卫星云图

2002年9月13日10时卫星红外云图3a可见,降雨云带自西北向东南方向移动,700 hPa偏南气流输送的水汽与500 hPa西西北气流中的冷空气在延安地区上空交汇形成较深厚的云层。从12点的图3b上看,主体云系仍在延安上空,13点以后随着主力云系继续向东南方向移动,延安地区逐渐处于云系后部。但延安以南地区仍有大片云系(图3c,d)。

4 探测飞机及主要检测仪器

使用Y-12型飞机,机上装备粒子测量系统(PMS)、机载微波辐射计,陕西省人影办卫星全球定位系统(GPS),温、湿度测量仪、空-地(语音、数据)传输系统。PMS系统主要包括两个标准的二维粒子图像探头(2D-C探头和2D-P探头)、一个标准的一维粒子向前散射探头(FSSP-100探头)。总的测量范围为 $0.5\text{ }\mu\text{m}\sim 6400\text{ }\mu\text{m}$,其中FSSP-100适用于测量小粒子

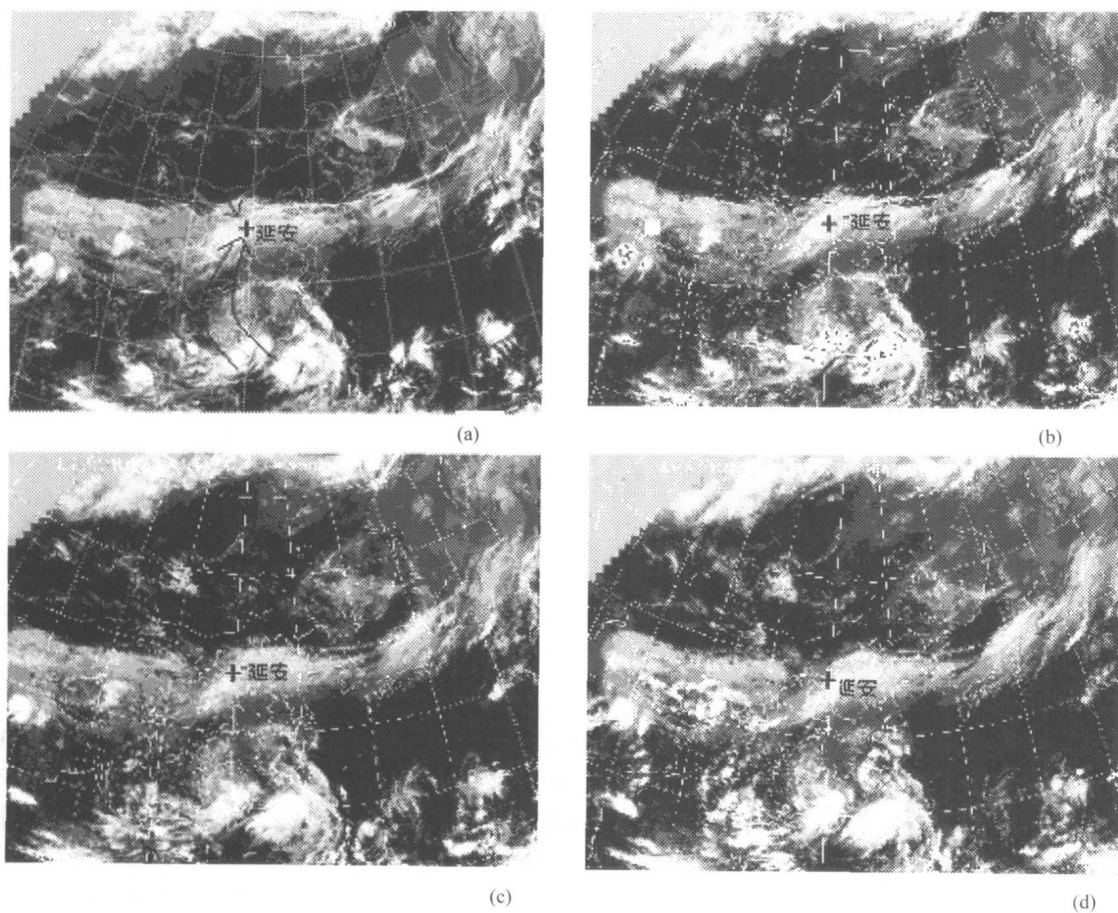


图3 2002年9月13日卫星红外云图(a 10时、b 12时、c 14时、d 16时)

($0.5 \sim 47 \mu\text{m}$)的浓度谱,计算相应的云水含量。2D-C 和 2D-P 探头主要是测量大的雨滴和冰雪晶粒子($25 \sim 6400 \mu\text{m}$),不仅可以给出所探测到的粒子的浓度,还可给出所探测到的雨滴、冰晶以及雪花粒子的图像数据。各测量探头功能列于表1、表2。

表1 FSSP-100 各通道测量粒子范围和分辨率

测量通道	粒子测量范围(μm)	分辨率(μm)
0	2.0~47	3
1	2.0~32	2
2	1.0~16	1
3	0.5~8	0.5

表2 二维探头测量粒子范围和分辨率

探头	粒子测量范围(μm)	分辨率(μm)
2D-C	25~800	25
2D-P	200~6400	200

5 航线设计及实施

5.1 航线设计

对第一架次作业、探测飞行,我们作了较为严谨的试验设计,试验的目的是利用机载 PMS 粒子测量系统检测在不同高度(过冷层)作业区以及在预计的下风方影响区内云的微物理变化,寻求播撒催化剂后能否观测到冰雪晶浓度的明显增加或者其他能直接说明催化有效的物理证据。依据天气条件和延安当天 07 时探空、雷达实时资料分析,9 月 13 日上午,延安尚处于较为有利作业的云区,云系顶高 5500 m 左右,3000~5000 m 主导风向为偏西风,风速 1~14 m/s,确定实施本场垂直探测作业飞行,入云后每隔 500 m 做一次水平探测,每层探测、作业面积控制在大约 150 km²(30 km×5 km)范围内,气温低于 0℃时使用液态二氧化碳(LC)开始催化作业。从飞机起飞始 PMS、GPS 等仪器进行连续采样。

5.2 探测、作业飞行

9 月 13 日(图略),飞机 11:26:22 从延安机场起飞,起飞方向 238°,地面温度 11.7℃,小雨。起飞后本场爬升至安全高度,开始进入每 500 m 一个高度层的水平飞行。11:34:41 进入 3000 m 层平飞约 10 分钟,飞行区域 4.5 km×30 km(135 km²);11:46 在 3583 m 高度,温度 0℃的条件下开始作业,11:46:36 进入 3500 m 层平飞约 10 分钟,飞行区域 4.0 km×21.5 km(86 km²);11:58:53 温度-1.0℃进入 4000 m 层平飞约 12 分钟,飞行区域 3.3 km×30.0 km(99 km²);12:15:44 温度-1.7℃开始在 4500 m 层平飞约 8 分 48 秒,飞行区域 2.1 km×34.0 km(71 km²)。12:24:32 作业结束。本次作业共用时 38 分钟,播撒液态二氧化碳(LC)20 kg,播撒速率约为 9 g/s,播撒层厚度约为 1000 m。12:30:52~12:34:46,在 5000 m 层平飞 3 分 54 秒。12:34:46 为下降点。下降航线如图 4b 所示,12:55 降落。飞行累计用时 1.5 小时。

5.3 下降航线穿越影响区估算

根据 08 探空资料 3000 m 高度风向为 297°,风速 1 m/s、3150 m 高度风向 290°,4 m/s、4000 m 高度风向 264°,12 m/s、5000 m 高度风向 261°,14 m/s。使用线性内插法算出 4500 m 高度的风速为 13 m/s,3500 m 高度的风速约为 7.6 m/s。理论估算催化剂在云中的自然扩散宽度大致为 1 m/s 量级^[1],催化剂在空间的水平位移主要依赖高空风。计算得知从 4500 m 高度作业结束时间 12:24:32 到下降穿越 4500 m 高度层航线时间 12:37:03,其间隔时间约为 13 min,该高度层高空风对催化剂的最大水平输送距离约为 10 km,4000 m 作业上升点 12:11:12 到下降穿越 4000 m 高度层航线时间 12:39:12 其间隔时间约为 28 分钟,高空风对 4000 m 高度层催化剂的最大水平输送距离约为 19 km,3500 m 作业上升点 11:56:00 到下降穿越 3500 m 高度层航线时间 12:41:22 其间隔时间约为 45 分钟,高空风对 3500 m 高度层催化剂的最大水平输送距离约为 20 km,均在上升段各水平飞行作业航迹区内。因此,下降航线在 12:37~12:43 之间穿越了 4500~3500 m 的作业区催化影响高度层。

6 云微物理观测结果

6.1 小云滴特征

为分析方便起见我们将飞机上升作业、探测区域界定为背景区,把在该区域内获取的资料

称其为背景值,把作业区平移后飞机下降航线可能穿越的区域定为影响区,在该区域内获取的资料称其为影响值。考虑到形成的冰雪晶落速不大(计算表明,在 20 min 左右的时间里雪花的沉降在 10^2 m 量级^[2]),故我们对背景区和影响区上下各外延 100 即选取 3400~4600 m 高度层作为催化影响层。FSSP 探头测量的 0 道(量程为 2~47 μm 分为 15 个通道)粒子在背景区平均浓度 N 为 2.7 个/ cm^3 ,在影响区的平均浓度为 3.5 个/ cm^3 。图 4a 是飞机探测的 FSSP 探头测量的 0 道 2~5 μm 档等间隔云滴浓度在背景区及可能影响区内垂直分布结果。可见该档粒子浓度在背景区随高度变化不大,平均值为 0.201 个/ cm^3 ,在影响区的变化幅度较大,平均值 0.368 个/ cm^3 ,极大值出现在 3900m 高度为 0.488 个/ cm^3 。由此推断由于云中存在一定量的过冷水,催化后部分小云滴转化成细小小冰晶,因其质量小于云滴,可核化成更多小冰晶^[3]。

6.2 冰雪晶增长情况

图 4b 是 2D-C 探头检测到的 25 μm 粒子在背景区及可能影响区内垂直分布结果,可见在与作业时段(11:46:36~11:56:22),3500 m 高度层,(11:58:53~12:10:56);4000 m 高度层和(12:15:44~12:24:32),4500 m 高度层相对应的影响区内同高度层上出现了 3 个明显的 N 的大值区,其值分别为 34.6 个/L、36.0 个/L、49.5 个/L。整层 N 的平均值是 28.6 个/L,比作业探测区 N 的平均值 3.2 个/L 高出 1 个数量级,并且在影响区的每个高度上 N 的平均值均在 10^1 个/L,而背景区每个高度上 N 的平均值均在 10^0 个/L。由此我们认为,这可能是因为液态二氧化碳的同质核化速率较快,大量进入云内的冰晶胚胎迅速生长成小冰晶所致。

2D-P 探头检测到 3800~4300 m 高度上可能影响区内尺度在 200 μm 左右的较大冰晶浓度值比背景区也有较明显的增加。其中 3800 m 高度背景值为 2710 个/ m^3 ,影响值为 5537 个/ m^3 ; 4250 m 高度背景值为 6585 个/ m^3 ,影响值为 12760 个/ m^3 。从催化响应时间分析,较小冰晶增长到该尺度是可能的。

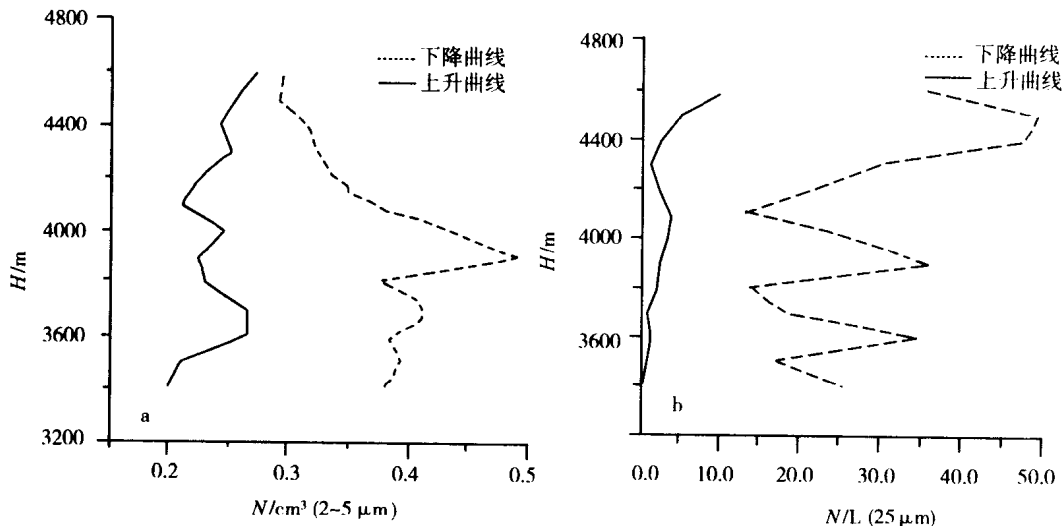


图 4 (a) FSSP: $d=2\sim5\ \mu\text{m}$ 部分云滴和云晶; (b) 2D-C: $d=25\ \mu\text{m}$ 部分大云滴和云晶

7 雷达回波

延安雷达站位于延安机场正北方刘万家沟,海拔 1170 m,距离机场约 2 km。图 5a 雷达 RHI 显示 10 时 23 分,方位 116°,距测站 15~100 km 处云顶最大顶高接近 5.9 km,飞机观测 0℃高度为海拔 3.5 km,距雷达站的相对高度为 2330 m,回波强度为 30 dBz 顶高,其下为正温区,在 0℃下方 116°方向 35~70 km 处分别有 3 块强度达 30~40 dBz 的降水回波。最大回波强度 40 dBz 位于 45 km 处。据测算过冷层厚度为 3.6 km,过冷层厚度与暖云区厚度约为 1.5:1。图 5b 12 时 26 分方位 120°作业区内,距雷达站 20 km 处,云顶高接近 6.5 km,最大顶高处对应的下方,20 dBz 回波出现两处凸起,凸起部分位于 0℃层上方。凸起高度大约有 500~700 m,我们认为云内局部出现了融化层上抬凸起,这可能与播撒 LC 后的同质核化产生冰晶增长,过冷滴消耗释放的溶解潜热致使局部温度升高有关,120°方向更远距 40~80 km 处亦有凸起,但强度明显小于催化区。

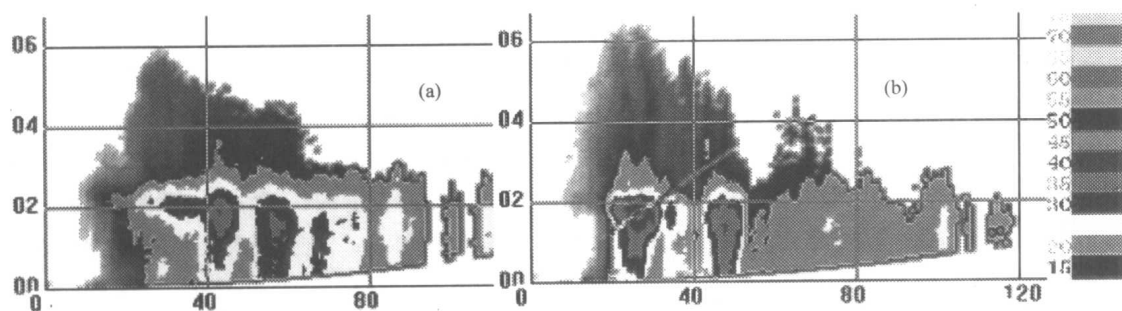


图 5 2002 年 9 月 13 日延安雷达 RHI 演变图(a10:23 分 116°、b12:26 分 120°、)

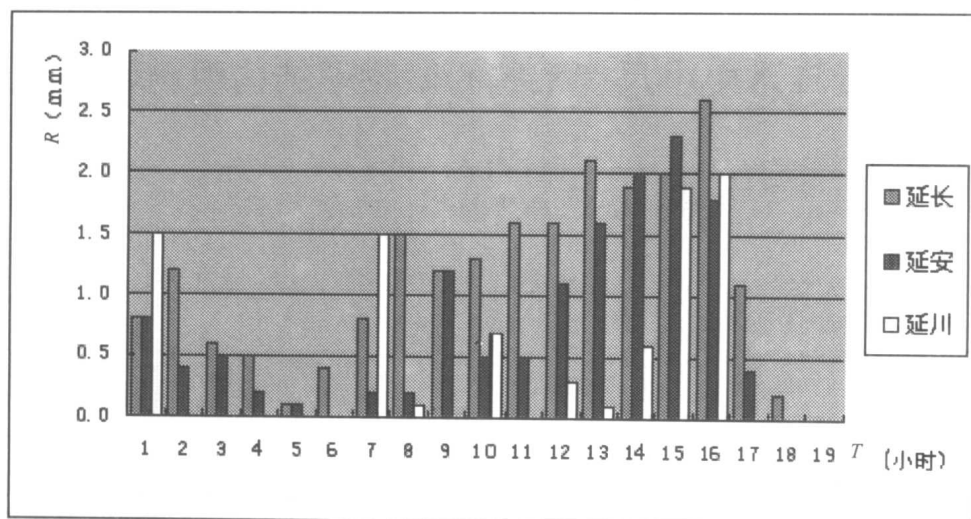
8 地面降水分析

据降水系统结合卫星红外云图资料分析表明,该降水系统 14 时以后自西向东云层变薄,降水减弱,但作业区上空云层中水汽含量丰富。通过对降水量统计分析表明,在作业前 5 小时内,吴旗、志丹、安塞(对比区)三站基本无降水,而在催化后几小时内(13 时~18 时),作业区及下游各站降水量最大达 2.0~2.6 mm(图 6),明显高于对比区三站降水(各站降水量最大为 1 mm 左右)。表明:①作业区条件选择是合理的;②主要影响区延安、延长、延川地面降水增加明显,它可能是人工增雨和自然雨共同影响结果。

9 结果

(1)催化下风方影响区内相应高度 3500 m、4000 m 和 4500 m 上 25 μ m 档冰晶出现 3 个明显的 N 的极大值区,其值分别为 34.6 个/L、36.0 个/L、49.5 个/L。整层 N 的平均值是 28.6 个/L,均高出背景值 1 个数量级。

(2)催化后约 40 min 内(11:46'~12:26')雷达观测到,催化云内局部出现了融化层回波凸



系列 1: 延长 系列 2: 延安 系列 3: 延川

图 6 作业影响区地面逐时降水演变图

起,这可能与播撒 LC 后冰核的同质核化产生冰晶增长,过冷滴消耗释放的溶解潜热致使局部温度升高有关。

(3)地面雨量统计分析,催化区及下游各站降水量最大达 2.0~2.6 mm,明显高于对比区三站降水(各站降水量最大为 1 mm 左右)。证明作业区作业条件选择是合理的,作业效果是明显的。

(4)存在问题:由于 FSSP 测量敏感性降低,测值比实际值偏低 1~2 个量级,影响了定量估算和更多信息的揭示,将在仪器检修后给出合理结果。

致谢:本文得到陈万奎、严采繁等同志的指导和 Y-12-3819 张乾坤机长的帮助,在此一并致谢。

参考文献

- [1] 余兴. 过冷层状云中飞机播云有效区域的模拟研究. 气象学报, 2002, **60**(2): 205~214
- [2] 陈万奎, 严采繁. 冰相雨胚转化水汽密度差的实验研究. 应用气象学报, 2001, **12**(3): 25~28
- [3] 游来光. 利用粒子测量系统研究云物理过程和人工增雨条件. 云降水物理和人工增雨技术研究. 北京: 气象出版社, 1994, 236~249pp

层状云降水中小尺度系统的微物理结构观测研究^{*}

牛生杰¹⁾ 孙照渤²⁾ 安夏兰³⁾

1) 南京气象学院气象灾害和环境变化省重点实验室(KLME), 南京 210044

2) 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 银川 750002

摘 要

利用机载粒子测量系统,于1994年6月、1996年5月对4次层状云降水过程进行了探测。分析这批资料表明:层状云降水系统中还存在大的云团,其水平尺度约为35~80 km,其微物理结构并不均匀,微物理参量的起伏小于对流区中微物理参量的起伏;不同降水发展阶段的粒子全谱(2~6400 μm)存在一定差异;云中含水量和云滴浓度随云中温度的降低(即高度增加)而增加,在融化层达到极大值;由此得到启示,层状云云团的催化潜力较大,人工催化作业应尽可能在这些区域中进行,且作业高度应尽可能高些。

关键词 层状云 微物理结构 降水转化率

1 引言

降水是大尺度天气系统、云微物理过程、云动力过程及影响降水形成和发展诸因素综合作用的结果。研究降水形成机制和降水物理特征,必须将宏观过程和微观过程结合起来,由天气系统、雷达和卫星资料分析降水过程的宏观特征,由云中云滴谱、含水量、冰雪晶、雨滴谱等资料分析降水形成的微观特征。Hobbs 等^[1~2]主持完成的“气旋计划”,研究了中纬度气旋云和降水中小尺度结构,进一步认识到大范围降水中的强降水区常是由各种性质不同的中尺度雨带(或区)构成的,无论是其结构还是动力学特点,各型雨带的差距很大。指出冷锋降水存在降水带,即暖锋雨带、宽冷锋雨带和窄冷锋雨带,它们中的雨核平均面积分别为106、119和64 km^2 ,暖区雨带和窄冷峰雨带的降水效率分别约为40%~50%和30%~50%,宽冷峰雨带中的一条,其至少具有80%的降水率。认为宽冷峰雨带中到达地面的降水量约有20%来源于高空“播撒带”,而另外80%来源于“馈赠带”。

Fleishauer 等^[3]于1999年11月~2000年4月利用机载粒子探测系统对美国大平原的混合相中云系采用拉格朗日型垂直螺旋式飞行探测。所探测6块云中的5块温度为0~-31℃,属混合相云。6块中的4块云系是一个完整的整体。这类云中含水量随高度增加,冰水含量的峰值出现在云的中部或下部;另外两块云呈现了多层结构,即云层之间存在无云区,这类云中大量的冰粒子出现在云的顶部和每层云的底部。说明两类云中降水的形成有着不同的机制和动力学特征。这项研究有两个目的,一是为数值天气预报模式提供初始化资料,发展云物理过

• 国家自然科学基金项目40171553和科技部2001BA901A项目共同资助。