

2002年秋季陕北地区一次锋面 云系综合探测分析^①

陈保国¹ 樊 鹏¹ 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. 陕西省延安市气象台)

提 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2002年9月13日陕北地区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,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融化层出现的局部凸起,可能是播撒液态二氧化碳催化后过冷云水消耗释放的溶解潜热导致融化层局部升温上抬形成。

关键词: 人工催化 LC催化 催化的物理响应

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。

1 天气形势

9月12日500hPa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热带高压控制,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,与副热带高压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500hPa高度上(图略)可以看出,副热带高压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。延安站13日08时 $T - T_d = 0.7$,对应卫星红外云图上(图略)可以看到,在作业区上空对应深厚降水云团。

在700hPa高度上,9月12~13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500hPa槽切变配合,是降水的影响系统。再是700hPa至500hPa形成相当的湿层,成为较有利

^① 获国家科技部“西部开发科技行动”重大攻关项目(2001BA901A41)课题资助。

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。在地面图上由于受冷高压控制,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。

2 卫星云图

2002年9月13日10时卫星红外云图(图略)可见,降雨云带自西北向东南方向移动,700hPa偏南气流输送的水汽与500hPa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时的云图(图略)上看,主体云系仍在延安上空,13时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(图略)。

3 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,陕西省人工影响天气办公室卫星全球定位系统(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 $0.5 \sim 6400 \mu\text{m}$,其中FSSP-100适用于测量小粒子($0.5 \sim 47 \mu\text{m}$)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。

4 航线设计及实施

4.1 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5500m左右,3000~5000m主导风向为偏西风,风速 $1 \sim 14 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,确定实施本场垂直探测作业飞行。入云后每隔500m做一次水平探测,每层探测、作业面积控制在大约 150km^2 ($30 \text{km} \times 5 \text{km}$)范围内,气温低于 0°C 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。实际飞行轨迹见图1(a、b)。

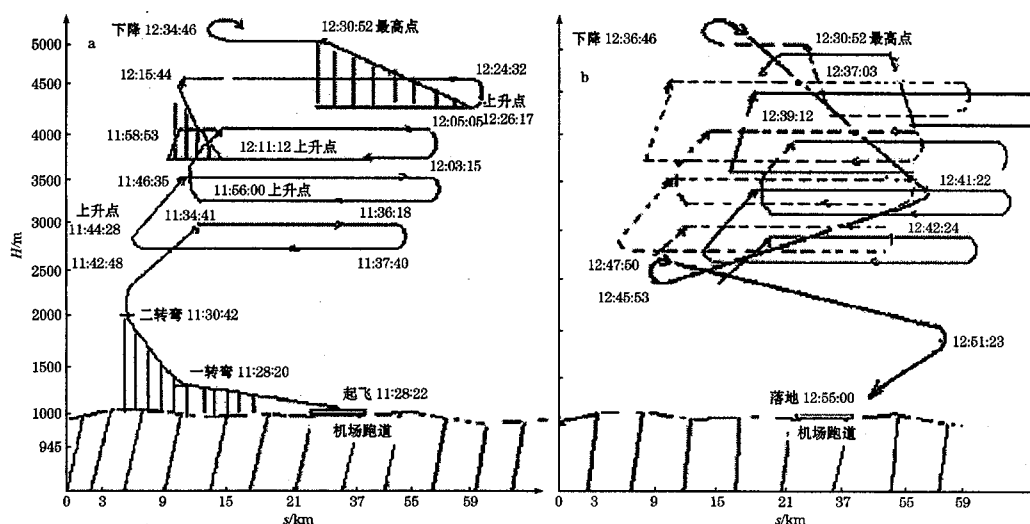


图1 02091301 航线设计示意图

a、上升作业、探测飞行轨迹,b、下降探测飞行轨迹

4.2 探测、作业飞行

9月13日,飞机11:26:22从延安机场起飞,起飞方向 238° ,地面温度 11.7°C ,小雨。起飞后本场爬升至安全高度,开始进入每500m一个高度层的水平飞行。11:34:41进入3000m层平飞约10分钟,飞行区域 $4.5\text{km}\times 30\text{km}(135\text{km}^2)$;11:46在3583m高度,温度 0°C 的条件下开始作业,11:46:36进入3500m层平飞约10分钟,飞行区域 $4.0\text{km}\times 21.5\text{km}(86\text{km}^2)$;11:58:53温度 -1.0°C 进入4000m层平飞约12分钟,飞行区域 $3.3\text{km}\times 30.0\text{km}(99\text{km}^2)$;12:15:44温度 -1.7°C 开始在4500m层平飞约8分48秒,飞行区域 $2.1\text{km}\times 34.0\text{km}(71\text{km}^2)$ 。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)20kg,播撒速率约为 $9\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$,播撒层厚度约为1000m。12:30:52~12:34:46,在5000m层平飞3分54秒。12:34:46为下降点。下降航线如图1b所示,12:55降落。飞行累计用时1小时30分。

4.3 下降航线穿越影响区估算

根据08h探空资料3000m高度风向为 297° ,风速 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、3150m高度风向 290° 、 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、4000m高度风向 264° 、 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、5000m高度风向 261° 、 $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。使用线性内插法算出4500m高度的风速为 $13\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,3500m高度的风速约为 $7.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。理论估算催化剂在云中的自然扩散宽度大致为 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 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4500m高度作业结束时间12:24:32,下降穿越4500m高度层航线时间12:37:03,其间隔时间约为13分钟,该高度层高空风对催化剂的最大水平输送距离约为10km,4000m作业上升点12:11:12,下降穿越4000m高度层航线时间12:39:12,其间隔时间约为28分钟,高空风对4000m高度层催化剂的最大水平输送距离约为19km,3500m作业上升点11:56:00,下降穿越3500m高度层航线时间12:41:22,其间隔时间约为45分钟,高空风对3500m高度

层催化剂的最大水平输送距离约为20km,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4500~3500m的作业区催化影响高度层。

5 云微物理观测结果

5.1 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分钟左右的时间里雪花的沉降在 10^2m 量级^[2]),故我们对背景区和影响区上下各外延100m即选取3400~4600m高度层作为催化影响层。FSSP探头测量的0道(量程为 $2\sim 47\mu\text{m}$ 分为15个通道)粒子在背景区平均浓度为 $2.7\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$,影响区为 $3.5\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。图2是飞机探测的FSSP探头测量的0道 $2\sim 5\mu\text{m}$ 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 $0.201\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$,在影响区的变化幅度较大,平均 $0.368\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$,极大值出现在3900m高度为 $0.488\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。由此推断,由于云中存在着一定量的过冷水,催化后部分小云滴转化成细小冰晶,因其质量小于云滴,可核化成更

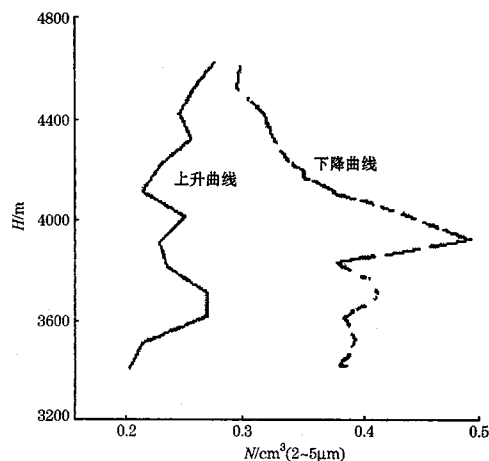


图2 FSSP0道 $2\sim 5\mu\text{m}$ 部分云滴浓度垂直分布

多小冰晶^[3]。

5.2 冰雪晶增长情况

图3是2D-C探头检测到的 $25\mu\text{m}$ 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),3500m高度层;(11:58:53~12:10:56),4000m高度层和(12:15:44~12:24:32),4500m高度层相对应的影响区内同高度层上出现了3个明显的粒子浓度的大值区,其值分别为 $34.6\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $36.0\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $49.5\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$ 。整层 N 的平均值是 $28.6\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$,比作业探测区 N 的平均值 $3.2\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$ 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 $10^1\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$,而背景区每个高度上 N 的平均值均在 $10^0\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$ 。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3800~4300m高度上

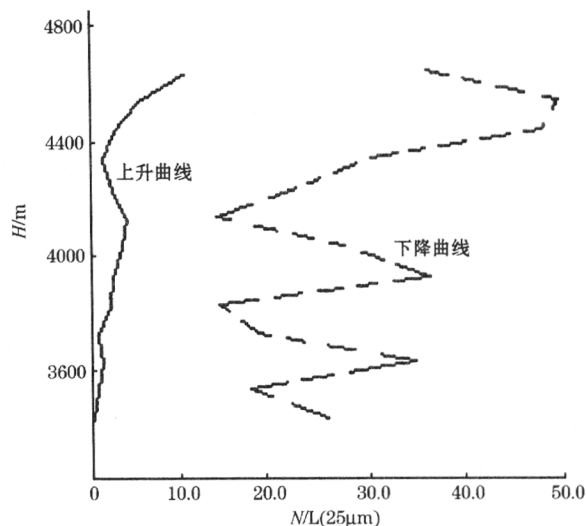


图3 2D-C探头 $25\mu\text{m}$ 粒子垂直分布

可能影响区内尺度在 $200\mu\text{m}$ 左右的较大冰晶浓度值比背景区也有较明显的增加,其中3800m高度背景值为 $2710\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$,影响值为 $5537\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$;4250m高度背景值为 $6585\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$,影响值为 $12760\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$,分别约高出1倍。从催化响应时间分析,较小冰晶增长到该尺度是可能的。

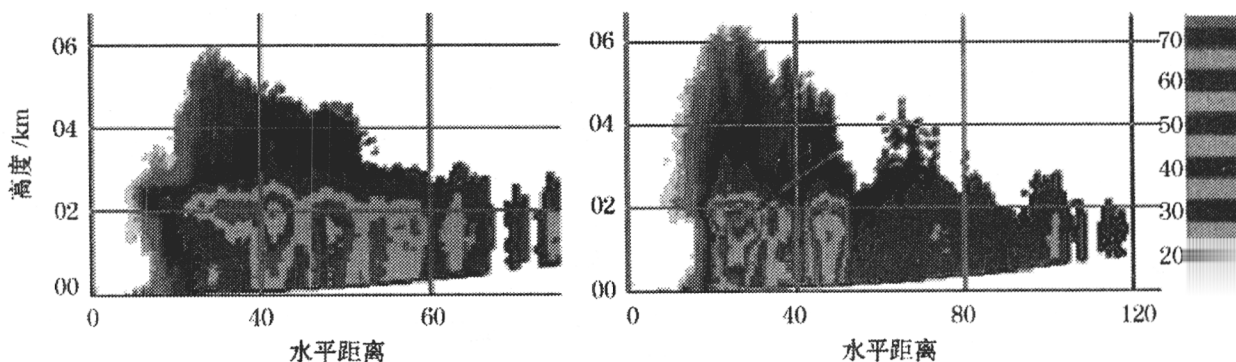


图4 2002年9月13日延安雷达RHI演变图

a. 10:23、 116° b. 12:26、 120°

6 雷达回波

延安雷达站位于延安机场正北方刘万家沟,海拔1170m,距离机场约2km。图4a雷达RHI显示10:23、方位 116° 、距测站15~100km处云顶最大顶高接近5.9km(拟飞行观测区域方向),飞机观测 0°C 高度为海拔3.5km,距雷达站的相对高度为2330m,回波强度为30dBz,其下为正温区,在 0°C 下方 116° 方向35~70km处分别有3块强度达30~40dBz的降水回波。最大回波强度40dBz位于45km处。据测算过冷层厚度为

3.6km,过冷层厚度与暖云区厚度约为1.5:1。图4b为12:26、方位 120° 作业区内,距雷达站20km处,云顶高接近6.5km,最大顶高处对应的下方,20dBz回波出现两处凸起,凸起部分位于 0°C 层上方。凸起高度大约有500~700m,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° 方向更远距离40~80km处亦有凸起,但强度明显小于催化区。

7 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(13~18时),作业区及下游各站降水量最大达2.0~2.6mm,明显高于对比区三站降水(各站降水量最大为1mm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(图5)。

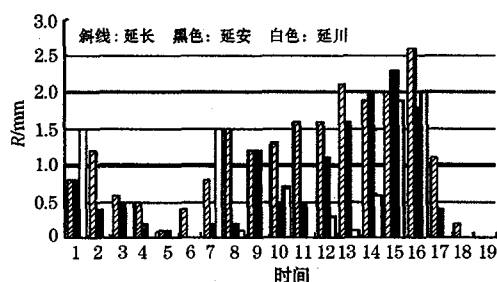


图5 作业影响区地面逐时降水演变图

8 结果

(1)催化下风方三个平飞催化区对应的影响区内(相应高度3500m、4000m和4500m)25 μ m档冰晶出现3个明显的粒子浓度极大值区,其值分别为34.6个 $\cdot$ L $^{-1}$ 、36.0

个 $\cdot$ L $^{-1}$ 、49.5个 $\cdot$ L $^{-1}$ 。整层N的平均值是28.6个 $\cdot$ L $^{-1}$,均高出背景值1个数量级。200 μ m以上雪晶粒子亦有倍数增加。

(2)催化后约40分钟内(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2.0~2.6mm,明显高于对比区三站降水(各站降水量最大为1mm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 本文得到严采繁、雷恒池等同志的指导和Y-12-3819张乾坤机长的帮助,在此一并致谢。

参考文献

- 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.
- 陈万奎. 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.
- 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: 236~249.

An Observational Study of Cold Front Cloud System in the Northern Shaanxi Province in the Autumn 2002

Chen Baoguo¹ Fan Peng¹ Lei Chongdian² Guo Qiang¹ He Jun¹

(1. Shaanxi Influence Weather Center, Xi'an 710015; 2. Yan'an Observatory)

Abstract

Precipitation stratiform cloud systems were detected and catalyzed by using airplane with airborne Particle Measuring Systems (PMS) and satellite Global Position System (GPS) in September 13, 2002 in the Northern Shaanxi Province. It shows that in the influenced areas by catalyzing the numbers of little ice crystals increased in order of magnitudes and partial melting layer's prominence in radar RHI was formed because of melting layer's increased local temperature. The cause may be the supercooled water consume melting latent thermal after LC catalysis.

Key Words: LC catalyzing catalyzing physical response influence weather