

一次过冷层状云催化云迹微物理特征的 卫星遥感分析*

戴进¹ 余兴¹ Daniel Rosenfeld² 徐小红¹

1 陕西省气象科学研究所, 西安, 710015

2 希伯莱大学地球科学学院, 耶路撒冷, 以色列

摘 要

利用卫星反演技术, 通过卫星观测到的一次人工增雨催化作业后形成的云迹线个例, 分析了云迹线与其周围云的光谱特征、亮温、亮温差、云顶粒子有效半径等云微物理特征, 比较了它们之间的差异, 揭示了这次过冷层状云催化的微物理效应。云迹实际上是持续时间超过 80 min、宽和深分别约为 14 km 和 1.5 km 的云谷。云迹周围的云顶粒子有效半径为 10—15 μm , 而云沟内的粒子在 15—24 μm 变化。周围云体由过冷滴组成, 中间可能夹杂了一些低浓度的冰粒子, 云沟内云的主要成分是冰。和周围未被催化的云相比, 0.6 μm 通道的光谱反射率, 在云沟处有明显的增加, 而 3.7 μm 通道反射率在云沟内是降低的, 尽管其绝对变化幅度不大, 但其相对变化幅度较大。随着播云时间的增加, 云沟深度、宽度逐渐增加, 云沟内和周围云体的温差逐渐增加, 对通道 4 和 5 而言, 在最早催化部位, 最大分别达到 4.2 和 3.9, 4 和 5 通道之间云沟内的亮温差也是随冰晶化时间的增加而增加, 最大为 1.4, 而云沟周围云为 0.2—0.4。云沟的形成、云沟内云顶温度的增加和 4, 5 通道之间亮温差的增加, 都足以说明被播云体变薄, 其原因是由于云顶降水使得云内的水流失, 云顶下降。云顶冰晶化、冰粒子增长成降水造成云顶下沉, 是云沟形成的主要原因。对于本次播云作业, 晶化作用在播云 22 min 后逐渐显现。在播云后 38—63 min, 有新的水云在云沟的中间部位生成, 可能是由于冻结潜热释放引起的上升运动所致。而新生水云在形成较早的云迹中没有出现, 这些较早形成的云迹在 80 多分钟的整个观测期间持续扩散。最终, 在周围云从外向云沟内的扩散过程中, 云沟开始消散。

关键词: 过冷层状云, 云迹, 微物理特征, 卫星反演, 催化。

1 引 言

1960 年美国发射的第一颗气象卫星 (TIROS), 揭开了人类从太空观测大气的历史篇章。卫星技术和卫星反演技术的发展, 为人类进一步认识云提供了新的观测平台。和地面常规观测或飞机、雷达等观测相比, 卫星能够使我们得到不同时间、空间尺度云和降水的信息。

20 世纪 80 年代末期, 当卫星第一次在太平洋上空薄的海洋性层积云中观测到航船的迹线时, 它使人们认识到从航船烟囱中排出的污染物气溶胶的

并合-抑制作用。它们直观而形象地展示了人类活动产生的气溶胶对海上层积云的辐射特征和微物理结构的影响^[1-3]。随着星载探测器通道的增加, 云微物理卫星反演技术逐渐发展和成熟。利用可见光波段、近红外或中红外波段的信息, 可以反演出多种云微物理特征参数, 其中最具代表性的是云顶温度、云顶高度、云的光学厚度和云顶粒子有效半径、云顶粒子相态等。

降水的形成与云的微物理特征是密切相关的。Rosenfeld 和 Lensky^[4] 利用 NOAA/ AVHRR 卫星资料反演的云微物理特征参数, 定性分析了云的相态、云的组成成分等, 定量反演了云顶粒子有效半径、云

* 初稿时间: 2005 年 9 月 2 日; 修改稿时间: 2005 年 11 月 2 日。

资助课题: 国家自然科学基金 (40575004) 和科技部社会公益研究专项 (2005DIB3J099)。

作者简介: 戴进, 1966 年生, 男, 副研, 主要从事人工增雨及云降水的研究。E-mail: daijohn@msn.com

顶温度,分析了对流云微结构的演变和云中降水的形成过程。此后这一方法还被用于研究森林大火烟气^[5]、城市和工业污染物等对降水的抑制作用^[6],大盐核对降水的恢复作用^[7-8]。国内的相关研究主要侧重于云和降水的微物理特征分析^[9-13],在利用微物理特征研究和分析云降水的结构演变和降水形成过程方面的工作很少。

通过卫星已经多次观测到人类活动和大自然所产生的气溶胶对云微结构和降水的影响,而这些影响可以看作是人类无意识的人工影响天气活动。但对于有意识的人工增雨催化作业,除了卫星观测到一次有可能是对流云播云的催化效应外^[14],至今仍没有观测到其他的人工播云效应。余兴等利用非均匀、非定常云中催化剂输送扩散模式^[15-16],经过对卫星所观测到的云迹与催化剂输送扩散模拟结果的多方面比较,证实了云迹是由播云造成的这一事实^[17]。本文利用卫星遥感反演技术^[4],分析了本次播云所形成云迹的微物理特征,通过比较云迹和周围云微物理特征的差异,进一步了解播云的物理效应。

2 播云作业试验

2000年3月14日14:15—15:49(北京时,下同),陕西省人工影响天气中心在陕西关中与陕西南部地区组织了1次飞机人工增雨作业,作业中使用An-26飞机AgI发生器,飞机在临潼本场(O点)盘旋上升,达到4 km高度后,进入西安开始自东向西的播云作业,具体的播云路线为:A(西安,14:15) B(咸阳,14:19) C(武功,14:33) D(麟游,14:42) E(凤翔,14:48) F(陇县,14:59) G(宝鸡,15:08) H(留坝,15:21) I(略阳,15:35) J(汉中,15:49),括号中表示飞行拐点的地名和时间,具体播云作业记录见表1。

表1 播云作业记录(播云时间14:15,卫星过境时间15:35)
Table 1 Operation report of cloud seeding (the initial seeding at 14:15, the satellite overpass at 15:35)

作业时间	距卫星过境时间(min)	飞行拐点位置
13:58	97	O(34°24' N, 109°14' E)
14:15	80	A(34°18' N, 108°56' E)
14:19	76	B(34°24' N, 108°43' E)
14:33	62	C(34°15' N, 108°13' E)
14:42	53	D(34°41' N, 107°47' E)
14:48	47	E(34°31' N, 107°23' E)
14:59	36	F(34°54' N, 106°50' E)
15:08	27	G(34°21' N, 107°08' E)
15:21	14	H(33°38' N, 106°56' E)
15:35	0	I(33°19' N, 106°09' E)

作业飞机的平均飞行速度为360 km/h,播云高度4.35 km、温度-10℃,播云94 min耗AgI 1200 g,云底高度2.3—2.8 km,云顶高度4.5—5.3 km、温度约-13—-17℃。播云后NOAA-14极轨卫星正好飞临关中上空,15:35 NOAA-14接收到播云后的资料。

3 天气形势

在3月14日20:00 500 hPa欧亚天气图上,中高纬度受位于80°E附近的两槽一脊控制。脊前短波槽不断下滑,在110°E附近有一明显的短波槽存在,冷平流位于高空槽后。存在较弱的上升运动(图1a)。相应地在地面图上,在50°N,110°E附近有一冷高压,还有一中心位于33°N,95°E的低压处于冷高压的前部。一冷锋系统从低压中心沿高压边缘向西南方向延伸,扫过播云作业区。

在锋面移动过程中,冷空气楔入暖空气底部,暖空气沿着锋面爬升,锋上空的暖空气上升,冷空气下沉。根据天气学原理,冷锋云系和降水在锋后,沿着锋面从远到近分别应是Ac, Ns, As, Cs和Ci,实际观测到的云包括Ci, Ac, Ns和As(图1b)。如果暖空气含有足够的水汽,不稳定层结存在时,会出现层云和层积云,有时会有毛毛雨或雾。地面实况为零星小雨。20:00西安的探空资料显示,在3.7—5.3 km(-6—-13℃)的云层中,空气沿着湿绝热递减率上升,其上有一逆温层。

4 云微物理特征反演

NOAA-14卫星携带的主要探测器为AVHRR-2,有5个探测通道,星下点分辨率为1.1 km。通道1的中心波长为0.6 μm,位于可见光波段,反映了目标物对太阳光的反射程度,云反射率可反映云的气溶胶光学厚度;通道2的中心波长0.9 μm,位于近红外波段,通道3中心波长为3.7 μm,位于中红外波段,该波段接收的辐射包括反射辐射和长波辐射,其反射太阳辐射的强度依赖于云粒子的大小;通道4,5位于远红外波段,中心波长分别位于10.8和12.0 μm,接收长波辐射。

对卫星资料校正处理后,通过0.6 μm反射率(红色)、3.7 μm反射率(绿色)和10.8 μm亮温(蓝色)对云图进行了合成(彩图2)。云迹上的转折点分别用A—H表示,分别对应于播云线上的飞行拐点A到H,

在云图上没有发现对应于 I 点的云迹转折点。按照 Rosenfeld 等提出的微物理方案^[4], F 点的上北部为深红色,表明是深厚的可降水云(不一定要降到地面),云中的粒子较大,云顶温度较低。黄色为较厚的过冷水云,绿色为较薄的过冷水云或小冰粒子组成的云,尤以 Ac 和 As 为典型。而云迹线呈红色,掩埋在周围的过冷层云中。A 点距卫星过境时间 80 min, H 点距卫星过境时间 14 min,随着播云进程的发展,云迹从 H 到 A 的播云时间逐渐增加。为了比较不同播云阶段的云迹特征,在云迹上取了 10 个剖面,分别以数字 1 到 10 表示。

彩图 3 是根据 Rosenfeld 等提出的反演方法得到的云迹微物理特征图。为了更清楚地了解云迹的立体结构,以 12.0 μm 云顶亮温作为背景,对云迹进行了三维处理。选择 12.0 μm 亮温是由于云在此波长处比 10.8 μm 的发射率大,云顶以上较少的水汽使得 12.0 μm 亮温比 10.8 μm 的亮温更接近于实际云顶温度。图 3a, b 为云迹的三维图,比较图 2 和图 3a 可以看出,云迹线 C '到 A '已经部分被它们周围的云遮蔽住。在图 3b 上,颜色愈蓝,温度愈低,总体趋势是云顶为北冷南暖,播云区域内温度为西高东低。

在可见光图像(图 3c)上,云迹线周围形成了阴影结构,说明播云在云顶产生了云沟,这一点在图 3b 上也可以明显看到。通过阴影长度,我们估算了云沟的深度,在剖面 9 处,云沟深度为 700 m 左右,剖面 7 处云沟深度为 1300 m,基本保持这个深度到剖面 5,在剖面 2 处云沟深度加深到 1500 m。

图 3d 为 10.8 和 12.0 μm 亮温差,较亮说明温差较大、云较薄。在亮温差图上,云迹较可见光图上清楚,被其上方的薄云遮蔽得不明显。在 F 点附近的云迹可以透过上面一层较高的薄云看到,且其宽度逐渐变宽。这表明在可见光图上云迹的变窄是由于早先存在的水云扩散,从两边靠近云沟将其弥盖所致,这一点在图 3a 中比较明显。

图 3e 为 3.7 μm 的反射率,云迹线在该通道上的反射特征与周围云的差异是很明显的,云迹线较黑,说明云滴较大或是冰云。在 3.7 μm 处冰有强吸收,冰粒子吸收一般是水的 2 倍。图 3f 是反演得到的云顶粒子有效半径(r_e),云粒子有效半径愈大,云就显得愈亮。

5 云沟内外微物理特征比较分析

为了更深入地分析云沟内外的微物理特征及其差异,图 4 给出了图 2 中 10 个剖面上云沟周围和云沟内 0.6 和 3.7 μm 通道的光谱反射率、10.8 和 12.0 μm 亮温以及粒子有效直径的分布状况。

5.1 可见光光谱反射率

0.6 μm 通道的光谱反射率,在云沟处有明显的增加。对同一剖面而言,云沟周围的可见光反射率基本不变或变化很小,但在云沟内的变化是较明显的。从剖面 10 到剖面 7,云沟周围的可见光反射率为 97% 左右,而云沟内可见光反射率的变化幅度由于播云作业结束时间不长,在剖面 10 处不明显,在剖面 9 处,为 10% 上下,剖面 8 处已超过 15%,剖面 7 处为 20%。剖面 6 和 5 处周围的可见光反射率为 90% 左右,云沟内可见光反射率的变化幅度,分别接近和超过 20%。在剖面 4 处,周围云的反射率为 85% 左右,云沟内的变化幅度超过 10%。剖面 3 和 2 处周围云的反射率为 80% 左右,云沟内的变化幅度在剖面 3 接近 10%,在剖面 2 超过 35%。剖面 1 处周围云的可见光反射率为 75%,云沟内的变化幅度超过 10%。

5.2 中红外通道光谱反射率

和可见光反射率类似,在同一剖面上,云沟周围的 3.7 μm 通道光谱反射率基本维持不变,而云沟内的反射率是降低的,尽管其绝对变化幅度不大,但其相对变化幅度较大。剖面 10—7 云沟周围的 3.7 μm 反射率为 23% 左右,云沟内的绝对变化幅度为 3%—5%,其相对变化幅度为 10%—20%。剖面 6 云沟内先降后增。剖面 5 和 4 周围云的反射率为 30%,云沟内的反射率在 20% 以下,绝对变化幅度超过 10%,相对变化幅度在 30% 以上。剖面 3—1 周围云的 3.7 μm 反射率在 35%—38% 之间,云沟内的绝对变化幅度超过 15%,相对变化幅度在 40% 以上。

在剖面 8, 6 和 1 的云沟内,反射率在局部是增加的,其原因是云沟内有水,在 3.7 μm 水比冰的反射率要大。这从粒子有效半径的变化也可看出,对应于 3.7 μm 反射率增加处的粒子有效半径变小。

5.3 云顶粒子有效半径

在剖面 10 处,云沟周围的云顶粒子有效半径(r_e)为 15 μm ,云沟内的 r_e 为 19 μm 左右。剖面 9 和 7 处,云沟周围的 r_e 为 15 μm ,云沟内最大的 r_e 为 22 μm 。剖面 8 和 6 处,云沟周围和云沟内的 r_e

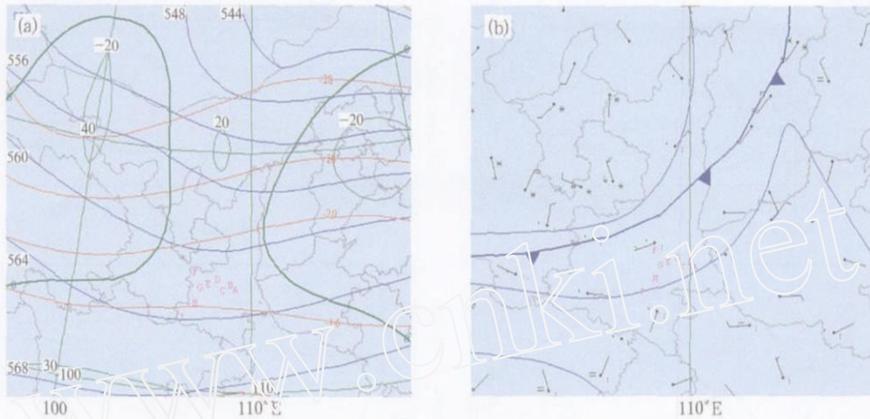


图1 3月14日20:00高空和地面天气图(a. 500 hPa高空图, 红线表示温度(°C), 兰线表示位势高度(dagpm), 绿线表示涡度($10^{-5}s^{-1}$); b. 锋面位置和地面要素, 字母A-I分别表示播云飞行拐点)

Fig. 1 Upper and surface synoptic maps at 12:00 UTC 14 March 2000

(a. 500 hPa isotherms (red, °C), isohypses (blue, dagpm) and vorticity isolines (green; $10^{-5}s^{-1}$);
b. Surface cold front, winds, and isopiestic using the standard synoptic symbols. The turning points of the seeding track are marked with characters A to I, successively)

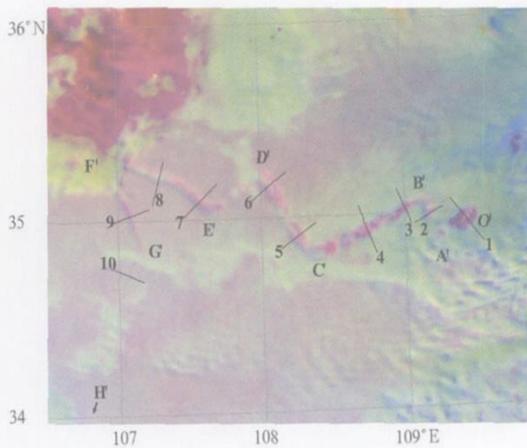


图2 0.6, 3.7 μm反射率(红色)、3.7 μm反射率(绿色)和10.8 μm亮温(蓝色)彩色合成图, (数字1~10分别表示10个剖面)

Fig. 2 The color composite of 0.6 μm (red), 3.7 μm (green) reflectance, and 10.8 μm brightness temperature (blue) (The straight lines labeled with 1~10, respectively, denote 10 cross sections)

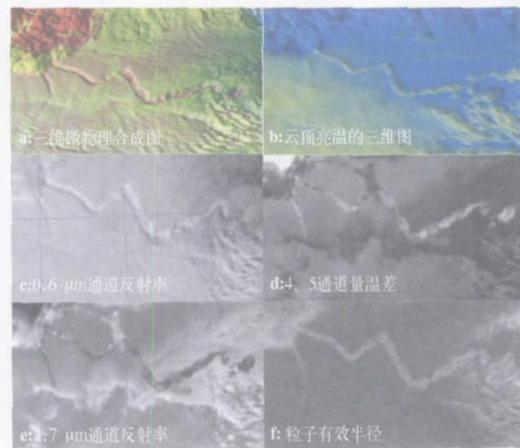


图3 云迹的微物理反演图

(a. 云迹的三维图, b. 12.0 μm 云顶亮温的三维图, c. 0.6 μm反射率, d. 10.8和12.0 μm亮温差, e. 3.7 μm反射率, f. 云粒子有效半径)

Fig. 3 Images of the seeding track from the microphysical retrieval (a. 3-D seeding track, b. relief of 12.0 μm cloud top brightness temperature, c. 0.6 μm reflectance, d. brightness temperature difference between 10.8 and 12.0 μm, e. 3.7 μm reflectance, f. effective radius of cloud particle)

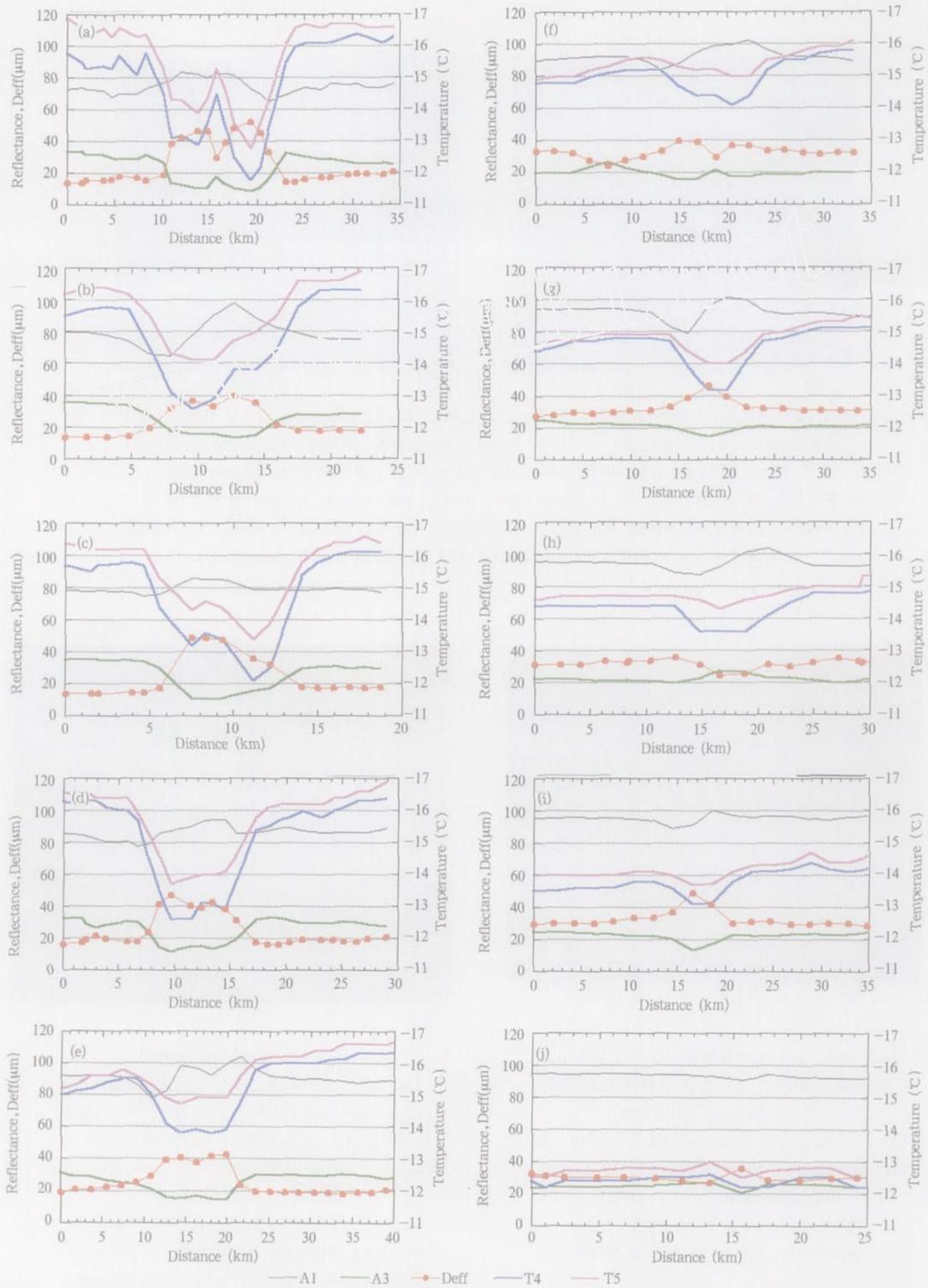


图4 对应于图2上10个剖面(a-j)的云迹特征 (左坐标标度 $0.6 \mu\text{m}$ (A1, 黑线)和 $3.7 \mu\text{m}$ (A3, 绿线)通道的反射率以及云顶粒子有效直径 (Deff, 红线, 每一像素以圆圈表示); 右坐标标度 $10.8 \mu\text{m}$ (T4, 蓝线)和 $12.0 \mu\text{m}$ (T5, 紫线)通道亮温)
 Fig.4 Microphysical features of the 10 cross sections (a-j) (the left ordinate scales: the reflectance at $0.6 \mu\text{m}$ (A1, black) and $3.7 \mu\text{m}$ (A3, green) channels, and the cloud top particle effective diameter (Deff, red line with full circles at each satellite pixel); the right ordinate scales: the brightness temperatures at $10.8 \mu\text{m}$ (T4, blue line) and $12.0 \mu\text{m}$ (T5, purple line) channels)

差不多,均为 $15 \mu\text{m}$,只是剖面 8 处云沟内水云部分的 r_e 降为 $12 \mu\text{m}$,而剖面 6 处云沟内的 r_e 先增加到 $20 \mu\text{m}$,在水云处降为 $15 \mu\text{m}$,然后又升到 $18 \mu\text{m}$ 左右。剖面 5 到 1 周围云的 r_e 都不超过 $10 \mu\text{m}$,云沟内的 r_e 在剖面 5 和 4 主要集中在 $20 \mu\text{m}$ 以上,剖面 3,2 和 1 云沟内的 r_e 分别在 $17-23$, $17-20$ 和 $17-24 \mu\text{m}$ 变化。从云顶粒子有效半径来看,周围云体的 r_e 为 $10-15 \mu\text{m}$,云沟内的 r_e 为 $15-24 \mu\text{m}$ 。结合 $3.7 \mu\text{m}$ 处的强吸收,云沟内云的主要成分是冰。由于混合云中典型冰粒子的大小比 $10-15 \mu\text{m}$ 大,比水滴的有效半径更大一些。因而,从相对较小的粒子有效半径和较低的温度来看,周围云体由过冷滴组成,中间可能夹杂了一些低浓度的冰粒子。而云沟内的冰,说明被播云体晶化,冰粒

子增长成降水后,云顶高度就会降低。

5.4 云顶亮温

云沟内的亮温较周围高,随着播云时间的增加,云沟内和周围云体的温差逐渐增加。表 2 和 3 给出了 10 个剖面 4,5 两个通道上云沟和云沟右侧周围云的亮温及其温差。从表 2 可以看出:云沟内和周围云的温差,在播云结束后不久的剖面 10 处很小,在剖面 9 处已经增加到 1.0 左右,剖面 7 处为 1.7 左右,剖面 5 处为 2.1 左右,剖面 3 到 1 都超过了 3 ,最大达到 4.2 。对于通道 5,在剖面 10 处温差仍很小,云沟内的温度在剖面 9 处较周围云高 0.5 左右,剖面 8,7,6,5 和周围相比分别高 $0.6,1.1,0.8,1.2$;剖面 4,3,2 中云沟内和周围的温差分别达到 $2.3,2.7$ 和 2.5 ;剖面 1 更达到 3.9 。

表 2 10 个剖面上云沟和周围云的 4 通道亮温及其温差()

Table 2 Bright temperatures and the differences between ambient cloud and cloud track for 10 cross sections in channel 4 ()

剖面	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
云沟内	-12.3	-13.1	-13.7	-13.2	-14.1	-13.9	-13.0	-12.1	-12.7	-11.9
周围云	-12.6	-14.1	-14.8	-14.9	-15.6	-16.0	-15.9	-15.9	-16.2	-16.1
温差	0.3	1.0	1.1	1.7	1.5	2.1	2.9	3.8	3.5	4.2

表 3 10 个剖面上云沟和周围云的 5 通道亮温及其温差()

Table 3 Bright temperatures and the differences between ambient cloud and cloud track for 10 cross sections in channel 5()

剖面	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
云沟内	-12.6	-13.8	-14.4	-14.0	-15.0	-15.0	-13.9	-13.5	-14.1	-12.9
周围云	-12.9	-14.3	-15.0	-15.1	-15.8	-16.2	-16.2	-16.2	-16.6	-16.8
温差	0.3	0.5	0.6	1.1	0.8	1.2	2.3	2.7	2.5	3.9

表 4 给出了 10 个剖面上云沟内和周围云 4,5 通道亮温差(BTD)。在刚冰晶化不久的云迹剖面 10 处,BTD 没有增加,但剖面 9 处 BTD 已经增加到 0.7 ,并一直增加,在剖面 3 和 2 处增加到 1.4 。 10.8 和 $12.0 \mu\text{m}$ 亮温差 BTD(图 3d)还可以反映云厚的减小。对于不透明的有云顶的云体,BTD 近为 0,但当云变得相当薄或失去水后,云下较暖物体的向上

辐射可以穿透它们并增加亮温。因为热辐射在 $10.8 \mu\text{m}$ 通道比 $12.0 \mu\text{m}$ 更容易透过,故该通道的亮温较高。对比较透明的云体或和下层有较大热对比的云,BTD 将增加。云沟周围云体的 BTD 为 $0.2-0.4$,说明云体基本不透明且厚。在云沟内,尽管比冰晶化时间有所滞后,BTD 还是增加的,说明随着冰晶化时间的增加,云体逐渐变薄。

表 4 10 个剖面上云沟内和周围云 4 与 5 通道亮温差

Table 4 Bright temperature differences of cloud track and amient cloud between channel 4 and 5 for 10 cross sections

剖面	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
云沟内亮温差()	0.3	0.7	0.7	0.8	0.9	1.1	1.1	1.4	1.4	1.0
周围亮温差()	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.7

5.5 云沟的宽度

表 5 给出了 10 个剖面上云沟的宽度。在刚冰晶化不久的云迹剖面 10 和 9 处,云沟不是很宽,随播云时间的增加,云沟宽度不断增加,在剖面 5 处

最宽达到 14 km,到剖面 1 宽度一直维持在 10 km 左右。结合云沟的深度来看,云沟实际上是一条宽达 14 km 左右、深达 1.5 km 的云谷。

表 5 10 个剖面上云沟宽度

Table 5 Widths of the seeding track for 10 cross sections

剖面	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
云沟宽度(km)	4	6	9	10	13	14	10	9	10	12

6 播云效应的物理解释

NOAA/AVHRR 资料的多光谱分析清楚地反映了云沟中云的宏观和微观变化及其与周围云的差异,而这些变化是由飞机人工播云增雨作业引起的。

播云在云顶产生了云沟,随着播云时间的增加,云沟的深度逐渐增加,在剖面 9 处为 700 m,到剖面 2 已达到 1.5 km。云底在 2.3—2.8 km 处,云沟底下仍有 0.8—1.3 km 的云层。早期的试验观测表明,对厚度小于 1 km 的过冷层状云播云,能形成清晰的持续时间超过 2 h,35 min 后扩展宽度达到 3 km 的云坑,对较厚的层云催化也会出现冰晶化现象,但很少会形成云坑^[18-19]。非常幸运的是,此次作业后卫星刚好过境,通过卫星观测到了对深厚层云催化后,形成的持续时间超过 80 min、宽达 14 km 左右、深达 1.5 km 的云谷。播云使得云的粒子有效半径发生了明显的变化。云沟周围云的粒子有效半径为 10—15 μm ,大部分在 15 μm 以下,而云沟内的粒子有效半径超过 15 μm ,最大为 24 μm 。这和云降水所要求的粒子有效半径阈值 14 μm 相吻合^[20]。

播云使得云沟内的温度较周围云的温度高。随着播云时间的增加,对通道 4 和 5 而言,云沟内和周围云体的温差逐渐增加,另外,4 与 5 通道之间的亮温差也逐渐增加。

可见光图上的云沟、云沟内云顶温度的增加和亮温差的增加都足以证明被播云体变薄。被播云体变薄是由于降水从云顶降下,使得云内的水流失,云顶下降。

本次播云的晶化作用在播云 22 min 后出现(图 2 中 G'点以南)。这一时间是通过云迹出现点到 G 的距离和飞机催化作业 GH 段的飞行时间和距

离的比较估算得到的。冰晶化发生作用可首先从 3.7 μm 反射率的减小看到,此后不久,云顶开始下沉,形成了云沟,正如在图 2 上剖面 10 以南的那样。根据云迹上的转折点(A'—H')和播云作业线上的飞行拐点(A—H)的飞行时间和距离,也可以估计出各段云迹线出现和持续的时间。在播云 27 min,即卫星探测到冰晶化开始 5 min 后,云顶温度开始升高,这一点可从图 3a,b,c 中 G'点以北看到。另外,BTD 的增大几乎和晶化同时出现,尽管 BTD 增大,但云沟中 0.6 μm 的反射率并没有减小,甚至增加,这说明云仍然相当厚并含有较多的各种形式的水。中等的 BTD 和高的可见光反射率表明此时的云属于典型的趋于成熟的冰相降水云。

随着冰晶化的发展,晶化释放的潜热使得云沟中的空气上升,在云沟的中部形成了一条由过冷滴组成的云线。它发生在 F'点过后一点,在图 2 中比较明显(黄色部分),此时是播云后 38 min,云沟内小水云的增长一直持续了 25 min 直到 C'点。后来这些水云的消失表明云沟已处于成熟阶段,没有冻结潜热释放。而新生水云在形成较早的云迹中没有出现,那些较早形成的云迹在 80 多分钟的整个观测期间持续扩散。相对于云迹的初始发展阶段由于冻结潜热释放而形成的云,它们的成熟是和云迹的变窄及最终消散相联系的,主要是由于云沟周围的云向云沟内扩散的缘故。

7 结 论

借助于卫星观测到的一次人工增雨播云作业后所形成的云迹线个例,利用卫星反演技术,分析和比较了云迹线与其周围云的光谱特征、亮温、亮温差、云顶粒子有效半径等云微物理特征及其它它们之间的差异。

在可见光图像上,云迹线周围形成了阴影结构,

说明播云在云顶产生了云沟,云沟深为 700—1500 m 左右,云沟宽度 4—14 km。本次作业所形成的云沟,实际上是一条持续时间超过 80 min、宽达 14 km、深达 1.5 km 的云谷。

对于 0.6 μm 通道的光谱反射率,云沟周围基本不变或变化很小,在云沟处有明显的增加。增加的幅度为 10%—35%。

云沟周围的 3.7 μm 通道光谱反射率基本维持不变,而云沟内的反射率是降低的,尽管其绝对变化幅度不大,但其相对变化幅度较大,都在 10%以上,最大超过 40%。

云迹周围的云顶粒子有效半径为 10—15 μm ,而云沟内的多在 20 μm 以上。云顶是由过冷的接近毛毛雨的粒子或混合相的云粒子组成,云沟内云的主要成分是冰。

和周围未被催化的云相比,云沟内的温度逐渐升高。对通道 4 和 5 而言,云沟内和周围云体的温差逐渐增加,最大分别达到 4.2 和 3.9。另外,4 与 5 通道之间的亮温差,云沟周围云为 0.2—0.4,变化较小,在云沟内,随晶化时间的增加而逐渐增大,最大为 1.4。

云沟、云沟内云顶温度的增加和亮温差的增大都足以说明被播云体变薄,其原因显然是由于云顶降水使得云内的水流失,云顶下降。

卫星分析清楚地反映出了本次播云作业后云沟中云的宏观和微观变化及其与周围云的差异,而这些变化是由飞机人工增雨播云作业引起的。

对于本次播云作业,冰晶化作用在播云 22 min 后逐渐显现。云顶冰晶化、冰粒子增长成降水造成云顶下沉是云沟形成的主要原因。随着云迹冰晶化时间的不断增加,云沟深度逐渐加深,同时,在播云后 38—63 min,有新的水云在云沟的中间部位生成,可能是由于冻结潜热释放引起的上升运动所致。而新生水云在形成较早的云迹中没有出现,这些较早形成的云迹在 80 多分钟的整个观测期间持续扩散。最终,在周围云从外向云沟内的扩散过程中,云沟开始消散。

参考文献

[1] Coakley J A, Bernstein R L, Durkee P R. Effects of ship-stack effluents on cloud reflectivity. *Science*, 1987, 237: 1020-1022

- [2] Radke L F, Coakley J A, King M D. Direct and remote sensing observations of the effects of ships on clouds. *Science*, 1989, 246: 1146-1149
- [3] Albrecht B A. Aerosols, cloud microphysics and fractional cloudiness. *Science*, 1989, 245: 1227-1230
- [4] Rosenfeld D, Lensky I M. Spaceborne sensed insights into precipitation formation processes in continental and maritime clouds. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, 79: 2457-2476
- [5] Rosenfeld D. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 3105-3108
- [6] Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 2000, 287: 1793-1796
- [7] Rosenfeld D, Lahav R, Khain A P, et al. The role of sea-spray in cleansing air pollution over ocean via cloud processes. *Science*, 2002, 297: 1667-1670
- [8] Rudich Y, Khersonsky O, Rosenfeld D. Treating clouds with a grain of salt. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 2060-2064
- [9] 刘健,许健民,方宗义. 利用 NOAA 卫星的 AVHRR 资料分析云的性质. *应用气象学报*, 1998, 9(4): 449-455
Liu Jian, Xu Jianmin, Fang Zongyi. Analysis of the cloud properties using NOAA/AVRHH data. *Quart J Applied Meteor (in Chinese)*, 1998, 9(4): 449-455
- [10] 刘健,许健民,方宗义. 利用 NOAA 卫星的 AVHRR 资料分析云和雾顶部的尺度特征. *应用气象学报*, 1999, 10(1): 28-33
Liu Jian, Xu Jianmin, Fang Zongyi. Analysis of the particle sizes at top of cloud and fog with NOAA/AVRHH data. *Quart J Applied Meteor (in Chinese)*, 1999, 10(1): 28-33
- [11] 张杰,李文莉,康凤琴等. 一次冰雹云演变过程的卫星遥感监测与分析. *高原气象*, 2004, 23(6): 758-763
Zhang Jie, Li Wenli, Kang Fengqin, et al. Analysis and satellite monitor of a developing process of hail cloud. *Plateau Meteor (in Chinese)*, 2004, 23(6): 758-763
- [12] 张杰,张强,康凤琴等. 西北地区东部冰雹云的卫星光谱特征和遥感监测模型. *高原气象*, 2004, 23(6): 743-748
Zhang Jie, Zhang Qiang, Kang Fengqin, et al. Satellite spectrum character of hail cloud and pattern of remote sensing monitor in East of Northwest China. *Plateau Meteor (in Chinese)*, 2004, 23(6): 743-748
- [13] 张文建,徐健民,方宗义等. 暴雨系统的卫星遥感理论和方法. 北京:气象出版社,2004. 117-173
Zhang Wenjian, Xu Jianmin, Fang Zongyi, et al. Theory and Methods of Satellite Remote Sensing of Rainstorm System. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 117-173
- [14] Woodley W L, Rosenfeld D, Strautins A. Identification of a seeding signature in Texas using multi-spectral satellite imagery. *J Wea Mod*, 2000, 32(1): 37-52
- [15] 余兴,樊鹏,王晓玲等. 层状云中非垂直多条撒播线源催化剂扩散的数值模拟. *气象学报*, 1998, 56(6): 708-723
Yu Xing, Fan Peng, Wang Xiaoling, et al. Numerical simula-

- tion of multiple line source diffusion of seeding agent within stratus. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 1998, 56(6): 708-723
- [16] Yu Xing, Dai Jin, Jiang Weimei, et al. A three-dimensional model of transport and diffusion of seeding agents within stratus. *Adv Atmos Sci*, 2000, 17: 617-635
- [17] 余兴,戴进,雷恒池等. NOAA 卫星云图反映 AgI 播云物理效应. *科学通报*, 2005, 50: 77-83
- Yu Xing, Dai Jin, Lei Hengchi, et al. Physical effect of AgI cloud seeding revealed by NOAA satellite imagery. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50: 44-51
- [18] Langmuir I. *Collected Works of Langmuir*, Vols. 10 and 11, Suits G, Way H E Eds. New York: Pergamon Press, 1961
- [19] Mason B J. *Clouds, Rain and Rainmaking*. Cambridge University Press, 1962. 189
- [20] Rosenfeld D, Gutman G. Retrieving microphysical properties near the tops of potential rain clouds by multispectral analysis of AVHRR data. *Atmos Res*, 1994, 34: 259-283

ANALYSIS OF SATELLITE OBSERVED MICROPHYSICAL SIGNATURES OF CLOUD SEEDING TRACKS IN SUPERCOOLED LAYER CLOUDS

Dai Jin¹ Yu Xing¹ Daniel Rosenfeld² Xu Xiaohong¹

¹ *Meteorological Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710015*

² *Institute of Earth Sciences, The Hebrew University of Jerusalem, Israel*

Abstract

Based on the satellite retrieval methodology, the spectral characteristics and cloud microphysical properties were analyzed that included brightness temperatures of channel 4 and 5, and the brightness temperature difference (BTD), the particle effective radius for cloud tracks caused by an operational cloud seeding. The same analyses of the ambient clouds were conducted for comparing the property differences between the cloud tracks and the surrounding clouds, and the microphysical signatures of cloud seeding were revealed. The cloud tracks actually were a cloud valley 1.5 km deep and 14 km wide lasting more than 80 minutes. The particle effective radius of ambient clouds was 10 - 15 μm , while that of cloud tracks ranged from 15 to 24 μm . The ambient clouds were composed of supercooled droplets, possibly with low concentrations of ice particles; the composition of the cloud within the seeding track was ice. Within the cloud tracks, the reflectance at 0.6 μm increased obviously, and the reflectance at 3.7 μm decreased with rather large relative varying magnitude compared with the unseeded ambient clouds. As cloud seeding advanced, the width and depth were gradually increased, and their maximums covered 14 km and 1.5 km. Simultaneously, the cloud top temperature in the tracks became progressively warmer with respect to the ambient clouds; the maximum temperature differences reached 4.2 and 3.9 at the first seeding positions for channel 4 and 5. In addition to, the BTD in the tracks also increased steadily to a maximum of 1.4, contrast to 0.2 - 0.4 of the ambient clouds. The evidence that the seeded cloud became thinner comes from the visible image showing a valley, the warming of the cloud tops in the seeded track and the increase of BTD in the seeded track. The seeded cloud became thinner because the cloud top descended and it lost water to precipitation throughout its depth. For this cloud seeding case, the glaciation became apparent at cloud tops about 22 minutes after seeding. The formation of a cloud valley in the supercooled layer clouds is mainly because that the seeded cloud volume glaciated into ice hydrometeors that precipitated and so lowered cloud top height. A thin line of new water clouds formed in the middle of the seeded track between 38 and 63 minutes after seeding, probably as a result of rising motions induced by the released latent heat of freezing. These clouds disappeared in the earlier segments of the seeded tracks, which continued to expand throughout the observation period of more than 80 minutes. Eventually the seeding tracks started to dissipate by expansion of the ambient cloud tops inward from the sides.

Key words: Supercooled layer clouds, Cloud track, Microphysical signature, Satellite retrieval, Cloud seeding.