

用极轨气象卫星资料分析飞机增雨云层条件

刘 文

(山东省人工降雨办公室,山东省气象科学研究所,济南 250031)

摘要 综合应用 NOAA 卫星 AVHRR/3 和 FY-1 极轨气象卫星高分辨 $0.58 \sim 0.68 \mu\text{m}$ 可见光、 $1.58 \sim 1.64 \mu\text{m}$ 近红外和 $10.3 \sim 11.3 \mu\text{m}$ 红外多通道资料,充分考虑了云的厚度、云中粒子尺度和云顶亮温的信息,给出了适宜飞机增雨作业云层的卫星遥感判据,建立了云层作业条件分析模型。实际应用表明,卫星遥感分析图可以有效地监测、判识和分析云层的增雨作业条件,应用效果好,可作为飞机增雨航线设计、作业决策的重要依据。通过增雨个例的微波图像特征分析,初步分析了 AMSU-B 微波图像在人工增雨作业中的作用和应用前景。

关键词 极轨气象卫星 AVHRR 微波图像 人工增雨 作业条件

引言

飞机人工增雨(雪)作为合理开发空中云水资源的重要科技手段,已在我国 19 个省、自治区、直辖市和计划单列市普遍开展^[1],为抗旱减灾和缓解水资源不足发挥了重要作用。人工增雨作业需要分析省域范围天气特征和云层的细微变化,从而确定有利于增雨的区域和催化作业云层。常规探测资料在空间、时间尺度上都有一定的局限性,难以满足业务需要。极轨气象卫星空间分辨率可达 1 km ,为局地区域云层特征监测提供了重要手段。特别是 1998 年美国新一代极轨卫星 NOAA-15 和 1999 年我国装载 10 通道扫描辐射计的 FY-1C 的发射,多通道扫描计和新增加的微波通道辐射计为进一步监测云层特征提供了重要信息,同时为人工增雨作业提供了强有力的监测工具。本文利用新型高分辨率极轨气象卫星资料对层状云系降水特征进行监测,分析云层的增雨作业条件,指导决策飞机人工增雨作业,以提高人工增雨的科学性,增加作业效益。

1 新型极轨卫星资料的特点

新一代 NOAA 极轨气象卫星性能有了重大改进,主要特点是使用了改进的甚高分辨率辐射计(AVHRR/3),ATOVS 垂直探测器中增加了关键性的 AMSU 微波遥感仪器,第一次实现了全天候、全

球卫星遥感监测。

改进的甚高分辨率辐射计 AVHRR/3 有 6 个通道,光谱通道特性和主要探测目的见表 1^[2]。其中 3A 3B 两个通道交替使用,即白天播发 3A 通道资料,夜间播发 3B 通道资料。我国 FY-1C/D 的 10 通道扫描辐射计有与这 6 个通道光谱特性相同或相近的通道。多星联合探测一日可以多次获取高空间分辨率的云顶亮温、反射率等定量数据,从而定性或定量分析云的结构、云厚、云高、云粒子尺度及其分布特征。

表 1 AVHRR/3 光谱通道特性及主要探测目的

通道序号	波长 μm	光谱特征	主要用途	FY-1C/D 通道序号
1	0.58 ~ 0.68	可见光	白天云图	1
2	0.725 ~ 1.00	近红外	白天云图、植被	
	0.84 ~ 0.89	近红外	白天云图、植被	2
3A	1.58 ~ 1.64	近红外	区分冰、雪和云	6
3B	3.55 ~ 3.93	中红外窗区	云、地表、林火监测	3
4	10.30 ~ 11.30	热红外窗区	云、地表、海面温度	4
5	11.50 ~ 12.50	热红外窗区	云、地表、海面温度	5

新增加的 AMSU 探测器由两部分组成,一部分是含有 15 通道的 AMSU-A,主要用于改进大气探测;另一部分是包括 5 个通道 AMSU-B,其星下点分辨率为 15 km ^[3],是首次搭载在 NOAA 极轨卫星上的微波湿度探测器。AMSU-B 各通道光谱特征和探测目的如表 2。这 5 个通道能提供全球大气的水汽垂直分布特征,并能反映云中和云下的一些信息特征,如地表特征、可降水、雨率、大气湿度等,由于

波长较长,视大部分非降水云为小粒子,可穿透非降水云看到下垫面或穿透降水云的非降水云顶部直接遥感降水信息。

表 2 AMSU-B 光谱通道特征及其主要探测目的

通道 序号	中心频率 MHz	通道宽度 MHz	吸收 成分	峰值能量 贡献高度 hPa	探测目的
1	89,000±900	1000	H ₂ O	地面	地表特征,可降水
2	150,000±900	1000	H ₂ O	1000	雨率,可降水等
3	183,310±1000	500	H ₂ O	440	大气湿度
4	183,310±3000	1000	H ₂ O	600	大气湿度
5	183,310±7000	2000	H ₂ O	800	大气湿度

因此,多时次、高分辨的新型极轨气象卫星遥感资料,为人工增雨云层监测、作业条件分析提供了重要信息,从而为作业部位的决策提供了重要手段。

2 用 AVHRR 资料分析增雨作业条件

2.1 思路和原理

层状冷云是我国北方春秋旱季的主要降水云和飞机人工增雨作业对象。增雨作业首先要选择适合穿云飞行的云层,然后在飞行中由机载云微物理探测判别是否实施播撒催化。根据人工增雨机制的考虑及数值模拟结果和实际作业经验,降水处于发展或持续阶段的云层^[4]是适宜人工增雨作业的重要条件之一。地面无降水时,低层大气尚处于不饱和状态,实施增雨作业后的云层即使有增雨效果,产生的雨滴在下落过程中由于蒸发等原因也很难降到地面。因此,实际作业中常常把地面是否已有自然降水作为能否作业的条件之一,并采用多种手段对发展持续雨区进行综合监测和识别^[4]。云顶亮温、云体厚度也是判别可催化云的重要宏观物理量。极轨

气象卫星 1 km 分辨率的多通道 AVHRR 资料,为这些宏观量的获取提供了强有力手段。可见光通道反射率反映了云层厚度的信息,红外通道反映了云顶高度、温度的信息。刘健、董超华等人的研究^[5]发现,1.58~1.64 μm 的近红外通道(NOAA 卫星 CH3A、FY-1 卫星 CH6)反射率主要反映了云中粒子的尺度特征,粒子有效半径越大,反射率越小。特别当云的光学厚度较大时,反射率随粒子有效半径的增大而显著减小。对于具有一定厚度的降水云,综合应用可见光 1.58~1.64 μm 近红外通道资料,可以有效地监测云中可降水的信息,结合红外亮温资料可以分析适宜飞机人工增雨的宏观云层条件。

2.2 卫星资料与地面降水定性分析

2002 年 4 月 5 日,受黄淮气旋影响,山东大部和周边省份出现小雨。13:39(北京时,下同),NOAA-16 卫星观测在山东附近(30°~40°N,110°~123°E 区域)CH1 可见光图像上为白色调区,具有较高的反射率,表明除个别零星暗区外均被较厚的云层所覆盖。CH3A 近红外图像上有 3 个高反射率区,说明云粒子有效半径较小,产生地面降水的可能性不大。我们逐像元计算了 CH1 反射率与 CH3A 反射率的差值,图像见图 1a,色调越白表示两者差值越大。14:00 地面加密观测时正在降水的雨区实况见图 1b。与图 1a 比较发现,地面降水区与 CH1 与 CH3A 差值的高值区有很好的对应关系,无云区、较薄的云层和未降水的云(如 A、B、C 3 区)在 CH1 与 CH3A 图像上为暗色调区。江苏中部的 D 降水区也与图 1a 中的白亮 D 区相对应。说明 CH1 与 CH3A 差值可以反映地面降水的信息。

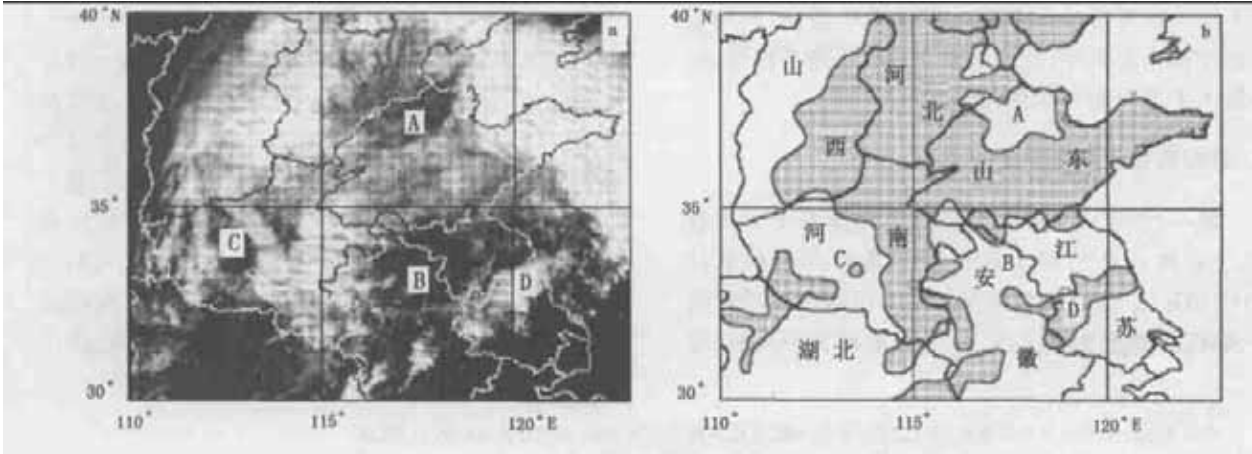


图 1 2002 年 4 月 5 日 NOAA-16 卫星 1.3 通道 13:39 差值图(a)与 14:00 地面降水实况图(b)的对比
(图 1a 中色调越白表示差值越大,图 1b 中灰色区表示地面降水区)

2.3 云层作业几率估算

对 10 次天气过程的 NOAA-16 卫星资料和地面加密观测实况进行统计分析发现,地面降水几率随 CH1 与 CH3A 反射率差 ΔR_{1-3} 的增大呈线性增大趋势,并建立了综合应用 CH1 反射率 R_1 、 ΔR_{1-3} 估计地面降水几率的二元线性回归方程:

$$P = 1.703 R_1 + 0.844 \Delta R_{1-3} - 0.879 \quad (R_1 > 0.4) \tag{1}$$

其中 R_1 为 CH1 可见光通道反射率, ΔR_{1-3} 为 CH1 与 1.58 ~ 1.64 μm 近红外通道(NOAA 为 CH3A、FY-1 为 CH6) 反射率差,相关性检验信度在 0.001 以上。它综合考虑了云的厚度和云中粒子尺度的信息,样本检验和实例验证都有较高的雨区判别精度,可以有效地判识、监测层状云降水区。飞机人工增雨是在一定自然降水条件下进行的,卫星判别的地面降水几率,表明了能否实施增雨作业的可能性,可以作为云层适宜增雨作业的几率。因此,对于 CH1 反射率 $R_1 > 0.4$ 的密蔽云区,可按式(1) 估计云层的作业几率 P 。

2.4 云层增雨条件判别

- 5 ~ - 24 $^{\circ}\text{C}$ 播云温度窗是层状冷云催化作业的重要条件之一,只有对云顶温度符合播云温度窗的云层作业才会有增雨效果。我国飞机人工增雨(雪)作业业务规范给出云顶温度的可播性指标为 - 4 ~ - 24 $^{\circ}\text{C}$ 。卫星红外通道观测的是假定云为黑体下的亮度温度,由于云的发射率小于 1,所以云顶亮温要比实际的云顶温度低。增雨作业的目标云为具有一定厚度的降水性层状云,其云的发射率在 0.75 左右,由卫星测值按普朗克公式推算出的亮温需加 5 ~ 10 $^{\circ}\text{C}$ 的修正^[6],适宜增雨作业的云层的云顶红外亮温大致应在 - 9 ~ - 34 $^{\circ}\text{C}$ 之间,而有些过冷却水云通道 4 的亮度温度可以低至 - 40 $^{\circ}\text{C}$ ^[7]。为不丧失作业机会,可将适宜作业云层的云顶亮温范围扩大到 - 9 ~ - 40 $^{\circ}\text{C}$ 。综合云的厚度信息和可作业几率,云层增雨作业条件的卫星遥感识别判据为:①非密蔽云区($R_1 \leq 0.4$),CH4 亮温高于 - 9 $^{\circ}\text{C}$,或作业几率不大于 0.2 时,无增雨条件;②亮温低于 - 40 $^{\circ}\text{C}$ 、作业几率大于 0.2 的密蔽云区,由于云顶太高,不适宜作业;③只有云顶亮温在 - 9 ~ - 40 $^{\circ}\text{C}$ 、作业几率大于 20 % 的密蔽云区才有增雨条件,按作业几率分为差、一般、好 3 个等级(表 3)。由于指标已量化,很容易在计算机上实现自动判别。我们研制了

相应的软件系统,利用 FY-1、NOAA 卫星 1A.5 数据集或局地数据集计算生成云层作业条件分析的图像产品,直接为飞机人工增雨作业监测、决策服务。

表 3 云层增雨作业条件的卫星遥感识别判据

CH1 反射率 R_1	CH4 亮温 $T/ ^{\circ}\text{C}$	作业几率 P	作业条件
$R_1 \leq 0.4$	$T > - 9$	$P \leq 0.20$	无
$R_1 > 0.4$	$T < - 40$	$P > 0.20$	不适宜
$R_1 > 0.4$	$- 40 \leq T \leq - 9$	$0.20 < P \leq 0.45$	差
$R_1 > 0.4$	$- 40 \leq T \leq - 9$	$0.45 < P \leq 0.70$	一般
$R_1 > 0.4$	$- 40 \leq T \leq - 9$	$P > 0.70$	好

2.5 产品应用个例分析

2.5.1 作业云层监测

2002 年山东出现了罕见的春夏秋连旱,9 月旱情发展十分严重。受减弱的后倾高空槽影响,9 月 11 日夜間山东开始出现弱降水天气过程。山东省人工降雨办公室于 9 月 12 日 08:52 ~ 11:05 在鲁中地区实施了飞机人工增雨作业,作业航线为潍坊—济南—济宁—博山—沂水—潍坊,作业高度 4500 m,作业层风向 280 $^{\circ}$,风速 12.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。FY-1C 卫星 09:48 监测的人工增雨作业条件分析图见图 2a,此时作业飞机正在空中实施催化作业。卫星监测鲁中地区上空云层的作业条件一般,个别像素较好,与飞行作业区有很好的对应(图 2b),其它地区基本无作业条件。08:00 ~ 14:00 6h 雨量分布见图 2b,除鲁西南有小片微量降水(最大 0.6 mm)外,主要降水区都在卫星监测的有作业条件的云层和实际作业区域内,济宁到博山航线附近降水达 2 ~ 5 mm(兖州站),卫星遥感分析无作业条件的区域基本无降水产生。说明本文提供的方法对飞机增雨作业的云层条件有一定的判识能力,对飞机穿云飞行作业、航线调整、作业决策有较强的指导作用。

2.5.2 作业决策应用

2002 年 10 月 25 日受低涡后部低槽影响,山东出现有利增雨的天气过程。13:19 NOAA-16 卫星监测的增雨作业条件分析图见图 3a,卫星监测山东半岛和鲁中东部云层的作业条件好,鲁中作业条件一般,其它地区作业条件差或无条件。作业区域应定在山东半岛或鲁中地区,半岛最佳。由于机场放飞原因,作业飞机于 15:41 起飞。考虑到系统移动较快且鲁中已处于系统尾部,飞机催化作业时间与卫星观测时间又相差 3 h 以上,飞机起飞后直飞半岛最佳作业区。航线(图 3b)为潍坊—胶南—招远

—文登—潍坊,作业高度 5100 m,作业层风向 270° 、风速 $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 18:05 飞机落地。14:00~20:00 6 h 雨量分布见图 3b,作业区及下风方雨量明显增大,

影响区雨量多在 $2\sim 8 \text{ mm}$,荣成最大达 10 mm ,而未作业的上风方雨量不足 1 mm ,取得了很好的增雨效果。

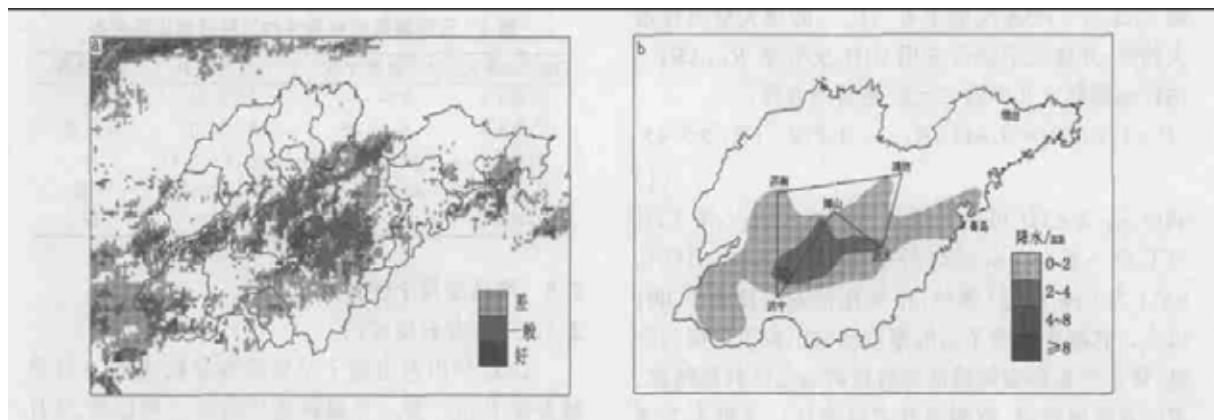


图2 2002年9月12日 FY-1C 卫星 09:48 监测增雨作业条件分析图(a),
08:52~11:05 作业航线和 08:00~14:00 6 h 降水实况图(b)

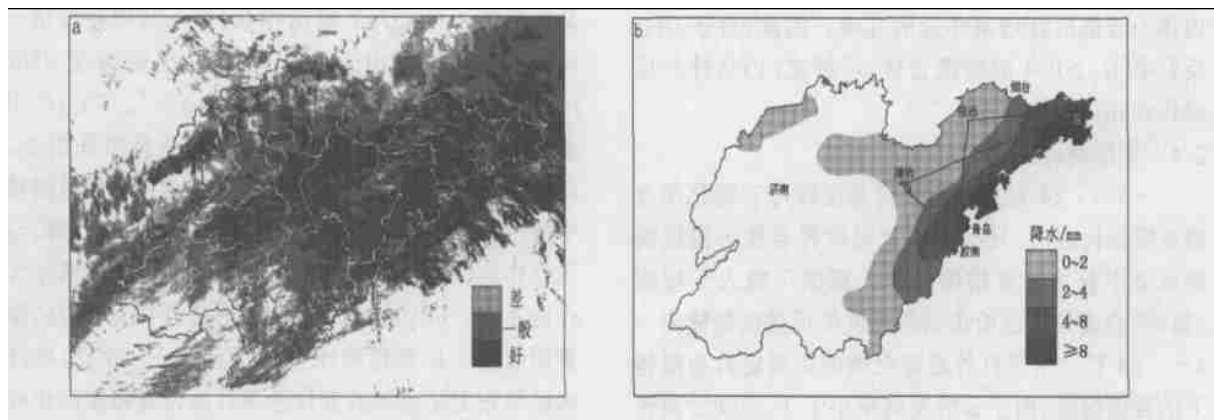


图3 2002年10月25日 NOAA-16 卫星 13:19 监测增雨作业条件分析图(a),
15:41~18:05 作业航线和 14:00~20:00 6 h 降水实况图(b)

2002年9月14日14:11, NOAA-16 卫星监测仅鲁南南部边缘的增雨作业条件一般,其它地区无作业条件。由于适宜作业的面积很小,不适宜飞机增雨作业。而根据其它资料分析,鲁东南具备增雨条件,并于15:40~18:16沿潍坊—薛城—临沭—沂南—胶南—高密—即墨—潍坊航线在鲁东南作业1架次。20:00观测仅在鲁东南南部边缘有不足 1 mm 的降水,其它作业区和非作业区均无降水,作业基本无效。

以上个例分析表明,卫星遥感分析图很好地反映了空中云层作业条件和增雨潜力,应用效果较好,可作为飞机增雨航线设计、作业决策的重要依据。

3 作业部位的 AMSU B 图像特征分析

对于降水云系,云中的粒子尺度分布从几微米到几毫米,相差3个量级。新一代 NOAA 卫星 AMSU-B 探测器的 1、2 通道波长较长,云中的云滴和较小尺度的雨滴对电磁波的反射作用弱,只有大尺度的降水粒子才对微波有较强的反射作用,可穿透非降水云看到下垫面或穿透降水云的非降水云顶部直接遥感降水信息;3、4、5 通道反映了 440、600、800 hPa 高度的湿度信息。因此,微波图像资料能反映云中降水粒子的分布特征和可作业层的湿度信息,为人工增雨作业部位的决策提供了有力手段。

1999年9月28日夜间到29日上午,受低槽冷

锋影响,鲁南、鲁东南、半岛地区出现小雨天气。省人工降雨办公室于9月29日上午组织 AN-26 飞机作业飞行1架次,作业区域为鲁东南。作业时间1 h 42 min,作业层风向 300° 、风速为 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,撒播层高度为4500 m。作业取得了明显的增雨效果,作业区上风方雨量不足2 mm,而作业区雨量在9 mm以上。利用国家卫星气象中心 TOVS 资料开发小组提供的国庆重要天气服务9月29日08:00 NOAA-15 微波 AMSU-B 通道1、2、4、5 图像(图略)资料进行分析。1、2 通道图像中,低于260 K的低温区已入海,表明地面降水已基本停止,但通道1 图像低温区面积大于通道2,主要是因为通道1 波长较通道2 短,对云中小粒子反射作用优于通道2,因此通道1 图像较通道2 图像更能反映云中可降水粒子的信息。3、4、5 通道的微波图像,反映了不同高度的湿度信息,特别是4 通道图像的峰值高度为600 hPa左右,与飞机人工增雨作业的高度相一致。结合通道1 峰值高度为800 hPa左右通道5 图像可以看出,降水云层具有明显的后倾特点,通道1、4、5 图像中低于260 K的低温区包含了作业区域,经人工催化后取得了明显的作业效果。

从这个例子可以看出,AMSU-B 微波通道图像,能反映云中可降水粒子的分布信息和适宜人工增雨作业催化高度上的湿度信息,对人工增雨作业催化部位的确定有较强的指导意义。1 通道图像的低亮温区(低于260 K的低温区)表征了云中可降水粒子的分布信息,4、5 通道图像的低亮温区表征了催化高度以下云层的湿度信息,三者重合区域可作为人工增雨催化部位。对1、4、5 通道低亮温重合区域进行催化作业,可以取得较好的作业效果。

4 结论

NOAA 卫星 AVHRR/3 资料和 FY-1 极轨气象

卫星资料具有通道多、精度高、分辨率高等优点,较好地反映了区域云层的细微变化,是飞机人工增雨云层特征监测的重要信息。综合应用可见光、近红外、红外通道资料,既考虑了云的厚度信息、云中粒子尺度的信息,又考虑了云顶温度的信息,可以有效地监测、分析云层的增雨作业条件。个例应用分析表明,利用本文方法建立的卫星遥感分析图对空中云层的作业条件和增雨潜力有较强的判识能力,实际应用效果较好,可作为飞机增雨航线设计、作业决策的重要依据。NOAA 卫星微波通道图像特征分析个例表明,AMSU-B 微波图像能反映人工增雨作业催化高度上降水粒子和大气湿度的信息,对人工增雨作业催化部位的确定有较强的指导意义。但由于微波辐射的复杂性和个例的限制,我们对微波通道图像的认识和应用还很肤浅,这将是我們下一步工作的重点。

参考文献

- 1 孟旭.二〇〇二年全国人工影响天气工作概述.人工影响天气(十六).中国气象局科技教育司,2003.120-126
- 2 董超华.气象卫星业务产品释用手册.北京:气象出版社,1999.211-220
- 3 张文建.世界风云纵览:新世纪极轨气象卫星和应用进展.中国遥感奋进创新二十年学术论文集.北京:气象出版社,2001.50-58
- 4 胡志晋.层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨.应用气象学报,2001,12(增):10-13
- 5 Liu J, Dong C, Zhu X. Thermodynamic phase analysis of cloud particles with FY-1C data. Meteor. Atmos. Phys., 2002, 80: 65-71
- 6 陈渭民.卫星气象学.北京:气象出版社,1989.120-121,469
- 7 Baum B A, Soulen P F, Strabala K I, et al. Remote sensing of cloud properties using MODIS airborne simulator imagery during SUCCESS, II Cloud thermodynamic phase. J. Geo. Res., 2000, 105(D9): 11781-11792

Analysis of Cloud Conditions for Aircraft Precipitation Enhancement Using Polar Orbiting Meteorological Satellite Data

Liu Wen

(Weather Modification Office , Shandong Provincial Meteorological Bureau , Jinan 250031)

Abstract : Using the visible channel ($0.58 - 0.68 \mu\text{m}$) , near infrared channel ($1.58 - 1.64 \mu\text{m}$) and infrared channel ($10.3 - 11.3 \mu\text{m}$) high-resolution data of polar-orbiting meteorological satellite NOAA and FY-1C and considering the cloud thickness , the particle sizes and brightness temperature of cloud top , the satellite criterions for aircraft cloud-seeding operation were given . The analysis models of cloud operating conditions were developed . The application shows that the analyzed satellite pictures can be used in monitoring and identifying the operating conditions of aircraft precipitation enhancement with the application effect being relatively good , and used as an importance basis of designing flight courses and operation decision-making for precipitation enhancement . The role and application prospects of AMSU-B microwave-channel images in precipitation enhancement were analyzed through a precipitation enhancement case .

Key words : polar-orbiting meteorological satellite , AVHRR , microwave image , precipitation enhancement , operational condition