

地形云人工增雨条件卫星探测反演个例分析^{* 1}

刘贵华¹ 余 兴² 戴 进² 徐小红² 岳治国¹
LIU Guihua¹ YU Xing² DAI Jin² XU Xiaohong² YUE Zhiguo¹

1. 陕西省人工影响天气中心, 西安, 710014
2. 陕西省气象科学研究所, 西安, 710014

1. Weather Modification Center of Shaanxi Province, Xi'an 710014, China
2. Meteorological Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710014, China

2009-01-18 收稿, 2009-09-13 改回.

Liu Guihua, Yu Xing, Dai Jin, Xu Xiaohong, Yue Zhiguo. 2011. A case study of the conditions for topographic cloud seeding based on the retrieval of satellite measurements. Acta Meteorologica Sinica, 69(2):363-369

Abstract Taking the precipitation processes occurred in 21 June 2007 at Baiyu mountainous area in the northern Shaanxi as an example, the microphysical properties of clouds were retrieved by the satellite retrieval methodology. From the orbital satellite data of higher spatial resolution, the retrieved microphysical structures show that on the windward side of the mountain, the cloud top temperatures are about $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the effective radii of the particles are around $9\text{ }\mu\text{m}$, with more super-cooled water and little ice crystal contained, and that the low clouds whose temperatures are about $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ produce more precipitation due to the involvement of higher clouds above them in the rain process. The cloud area on the windward of the mountain which is about 4000 km^2 brings about the good chance for the operational topographical cloud seeding. From the geostationary satellite data of higher temporal resolution, it is found, based on the three hour microphysical evolutions of clouds on the windward of the mountain, that the clouds had been maintaining rather deep, the effective radii of particles are stable, and no precipitation is triggered. Most cloud drops only experience the process transferred from diffusional growth to evaporation. All these suggest that the clouds on the windward of the mountain are the cloud system for the operational cloud seeding.

Key words Satellite retrieval, Topographic cloud, Conditions for cloud seeding, Supercooled cloud

摘 要 选取 2007 年 6 月 21 日陕西白于山区地形云降水过程, 用极轨卫星资料反演高空间分辨率的云微物理特征。对云降水物理结构分析表明: (1) 山前云区(迎风坡)云顶亮温(T)为 $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$, 粒子有效半径(R_e)为 $9\text{ }\mu\text{m}$, 含有丰富过冷水, 缺乏冰晶; (2) $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低云在有高云参与的情况下, 产生了较多的降水; (3) 山前云区面积约 4000 km^2 的区域, 存在较好的增雨作业条件。用静止卫星资料反演高时间分辨率的云微物理特征, 跟踪地形云 3 h 演变发现: 山前云区一直维持相当厚度($T < -28\text{ }^{\circ}\text{C}$), R_e 基本稳定, 没有启动降水过程, 多数云滴仅完成了一个从凝结到蒸发的过程, 山前云区为一个好的增雨作业云系。

关键词 卫星反演, 地形云, 人工增雨条件, 过冷云

中图法分类号 P405

1 引 言

层状冷云是中国北方主要的人工增雨作业云系。冷云催化是指云中自然降水不很充分、云水较

多且冰晶不足, 具有增雨潜力的前提下, 通过人工引入适量的冰核(或直接注入致冷剂触发均质核化生成冰晶), 加快冰水转化、促进冰晶增长, 提高降水效率, 达到增加降水的目的。因此, 利用云探测技术了

* 资助课题: 国家自然科学基金(40975087)和科技部公益项目(2005DIB3J099)。

作者简介: 刘贵华, 主要从事云降水研究。E-mail: liu_guihua@163.com

通讯作者: 余兴, 主要从事云降水物理及人工影响天气研究。E-mail: yuxing23@163.com

解云的状况和增雨潜力,识别适宜作业云体和时机成为人工增雨的关键技术之一。

多年来,人们一直致力研究识别适宜作业云体和时机的手段和方法。Grant 等(1974)提出了播云温度窗的概念,指出云顶温度处于 $-10 \sim -24$ °C 时具有可播性。Hudak 等(1988)指出,热带海洋气团的云顶温度高于 -20 °C 时才具有可播性,并估计了可增加的降水效率为 $2\% \sim 15\%$ 。Rokicki 等(1978)提出了对于一定状态的云,其最充分的降水对应于最佳冰晶浓度。胡志晋(2001)提出根据云降水的宏观特征(云顶、云底高度和温度、过冷层厚度、云中上升速度)和云微物理特征(冰面过饱和水汽差、过冷水、冰晶浓度)来识别人工增雨作业云体。但是,受观测技术及成本限制,人工增雨作业中有时很难获取较为准确的云中上升速度、云厚、过冷水、冰晶浓度等资料,而这些又是冷云催化中很关键的数量。

众所周知,云探测最有效的手段是飞机、雷达、卫星。由于卫星具有大范围连续性等优势,探测技术发展迅速,极轨和静止卫星均搭载了多通道探测器,获取高时空分辨率的多光谱资料,用于反演多种云物理特征参数,其中最具代表性的是云光学厚度、云顶粒子有效半径、云顶相态。国内外在卫星遥感反演云特征上做了大量的工作。Arking 等(1985)、Han 等(1994)、Nakajima 等(1995)相继利用卫星 $3.7 \mu\text{m}$ 通道资料反演了云光学厚度和有效半径。赵凤生等(2002)提出了一个利用 0.65 和 $3.7 \mu\text{m}$ 通道反演云光学厚度和云滴有效半径的迭代方法。刘健等(1998, 2003)利用 FY-1C 资料反演了水云的光学厚度和粒子有效半径,并利用 NOAA 卫星 3、4、5 通道的亮温及亮温差分析了云的性质。在云相态识别上,Key 等(2000)利用 NOAA 卫星 $3.7 \mu\text{m}$ 反射率确定了北极地区云的相态。Strabala 等(1994)、Baum 等(2000)提出了利用 MODIS 资料区分水云和冰云的方法。Pavolonis 等(2005)建立了多通道阈值用于识别卷云、密实冰云、水云、混合相态云和多层云等云相态。Rosenfeld 等(1998)建立了云微物理卫星反演方法,利用可见光反射率、温度和粒子有效半径识别水云、冰云、沙尘等,分析云降水物理过程;用于研究森林大火烟气(Rosenfeld, 1999)、城市和工业污染物等对降水的抑制作用(Rosenfeld, 2000)、大盐核对降水的恢复作用(Ru-

dich, et al, 2002),以及过冷层云中催化云迹的微物理结构(戴进等, 2006)。在增雨条件上,刘文(2005)利用 NOAA 资料给出过适宜飞机增雨作业云层的判据。

山区受地形强迫抬升作用经常形成地形云。当云体较厚、生命期较长时,山前通常会产生降水;当云体较薄、生命期较短时,在迎风坡形成的小云滴由于没有长到足够大,不能产生降水或降水不充分,又含有较丰富的云水,这类云通常具有较大的增雨潜力,也是经常选择的增雨对象。本文选取 2007 年 6 月 21 日陕西白于山区地形云降水过程,采用 Rosenfeld(1998)的云微物理卫星反演方法,用极轨卫星资料反演高空间分辨率的云微物理特征,分析云降水物理结构,选取适宜人工增雨作业的对象,用静止卫星资料反演高时间分辨率的云微物理特征,通过云顶双参数的三维显示,跟踪云的演变,证实选取的正确性。

2 反演技术及多光谱分析方法

NOAA/AVHRR 资料(星下点分辨率为 1.1 km , 5 个通道分别为 0.65 、 0.87 、 3.7 、 10.8 、 $12.0 \mu\text{m}$)和 FY2/VISSR 资料(星下点分辨率为 5 km , 5 个通道分别为 0.72 、 3.7 、 6.9 、 10.8 、 $12.0 \mu\text{m}$)包含了许多云降水信息,通过反演能够获得云的微物理特征。例如:可见光(0.65 或 $0.72 \mu\text{m}$)反映云的光学厚度(云厚),中红外($3.7 \mu\text{m}$)反映云顶粒子有效半径(粒子大小),红外(10.8 或 $12.0 \mu\text{m}$)反映云顶温度(冷暖或高低状况)。如果将可见光反射率赋予红色(色调越红云越厚), $3.7 \mu\text{m}$ 反射率赋予绿色(色调越绿 R_e 越小), $10.8 \mu\text{m}$ 亮温赋予蓝色(色调越蓝温度越高),那么,就可用红(R)、绿(G)、蓝(B) 3 基色组合的真彩图可视化显示云的物理特征。虽然单光谱反映了云的某种信息,但多光谱组合将反映出更加丰富的信息,结合云降水物理学知识,有可能从云厚、粒子大小、顶高的不同配置上分析云降水形成过程的更多信息,深化对云降水物理过程了解。鉴于资料获取的实时性和与地形云降水过程的匹配,本文选用 NOAA-18 资料,方法思路同样可用于 MODIS 和 FY-3A/VIRR。

2.1 反演方法

极轨卫星 L1B 数据和静止卫星 HDF 数据经过定标,生成可见光反射率和红外亮温数据后,计算通

道3(3.7 μm)反射率,由于3.7 μm 通道的辐射受大气中水汽影响较大,需进行水汽订正。在反演云顶粒子有效半径(R_e)之前,利用辐射传输模式,建立3.7 μm 反射率与 R_e 的查算表,将3.7 μm 通道云反射率($\rho_{3.7}$)和视场几何数据(太阳天顶角、卫星天顶角、太阳卫星相对方位角)作为输入量,查找查算表并插值计算 R_e ;为了避免地表辐射对3.7 μm 的影响,只计算光学厚度较厚的云像元 R_e (刘贵华等,2009)。

将可见光反射率、3.7 μm 反射率、云顶温度(T ,由10.8 μm 亮温近似表示)分别赋予红(R)、绿(G)、蓝(B)3基色值进行组合编码,形成RGB合成图。用色彩、纹理表征云特征,包括云类型、相态、 T (表征高度)、 R_e 等。由于3.7 μm 波段冰的吸收率是水的2倍,同一温度下冰云比水云反射率要小,反演的 R_e 要大很多。因此,发展较高冰晶化的云体表现为亮红色。而黄色的云体表示为由有效半径小的云滴组成,通常为水云(因小滴更不易冻结);温度低于0 $^{\circ}\text{C}$ 时为过冷水,厚的过冷水云在RGB合成图上显示为亮黄色。地表由于地面温度高、可见光反射率低和3.7 μm 反射率低,在RGB合成图上为蓝色。

2.2 云微物理特征多光谱综合分析方法

一是直接利用RGB合成图可视化分析云特征,二是利用反演值定量分析云特征,三是利用假定进行时空转换分析云垂直结构(Lensky, et al,2006)。

众所周知,卫星探测只能获取云顶的信息,为了了解云内状况,通过各态历经假定进行时空转换,即用不同顶高的云近似云中不同高度云的性状。各态历经假定的云物理学理解是:在一定区域内(1—3千个云像元或小于两个探空站间距离)存在各种不同顶高的云,假定区域内的大气温湿(温度、露点)状况和云凝结核(CCN)状况相近,那么,空气上升冷却饱和凝结形成这些云,则它们的云底高度、云滴的数浓度、粒子大小相近;如果上升同样高度,那么供云滴(相同数目)增长的水量相近,则云粒子增长大小相近(很可能的)。因此,用不同高度云的 R_e 来近似云内不同高度上的 R_e ,在云物理学上是合理的,这样通过选取不同高度的云就可以得到 R_e 随高度(以温度 T 表示)的变化曲线,即 $T-R_e$ 图,用于分析云中垂直结构。

实际分析中对假定需要把握两点:一是为保证

状况相近,近似云与被近似云不宜相距太远,且处于同一发展阶段(即用发展的云近似发展的云,用消散的云近似消散的云,否则就是偏离而非近似);二是考虑到云的水平不均匀性和大气状况不完全相同,对每一个高度都须选取尽可能多的云像元,用整体状况近似云内该高度上的状况。由于 R_e 表征粒子谱特征,无法进行统计意义上的平均,宜采用排序取中的办法来解决,具体做法如下:将区域内同一温度上所有的云像元按 R_e 从小到大排序,对样本数进行归一化处理(不同高度的样本数不一样),以5%为样本间隔单元(即5%对应第5%样本的 R_e ,10%对应第10%样本的 R_e ,...,95%对应第95%样本的 R_e ,100%时对应最大的 R_e),用50%表示该高度的总体状况,每隔1 $^{\circ}\text{C}$ 统计。对每一样本间隔作 $T-R_e$ 连线,并以不同颜色区分,得到 $T-R_e$ 图。

3 卫星探测与反演分析

2007年6月21日陕西省处于副热带高压边缘,以阴雨天气为主,空气潮湿。陕北白于山脉呈东西走向,长约250 km,山峰主体海拔高度1800 m,北坡山底至山顶30 km,高差约600 m(图1)。21日白天白于山区地面至700 hPa高度吹东北风,风速2—4 m/s,500 hPa以上吹西南风,从地面至200 hPa高度层温度露点差小,空气较湿。小时降水资料分析表明,21日白于山区附近3个气候站12—15时无降水。

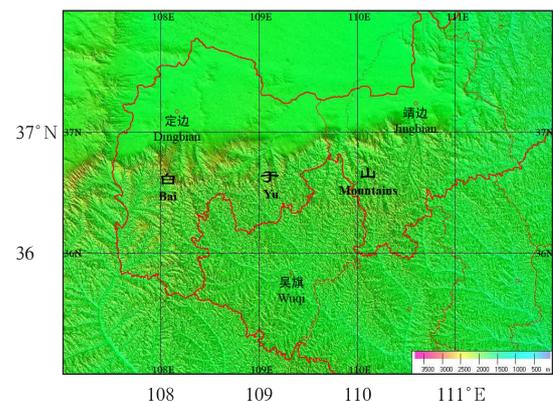


图1 陕西省白于山地形

Fig. 1 Topography of the Baiyu Mountain in the northern Shaanxi

3.1 极轨卫星反演云微物理特征

图2a为2007年6月21日13时23分(北京时

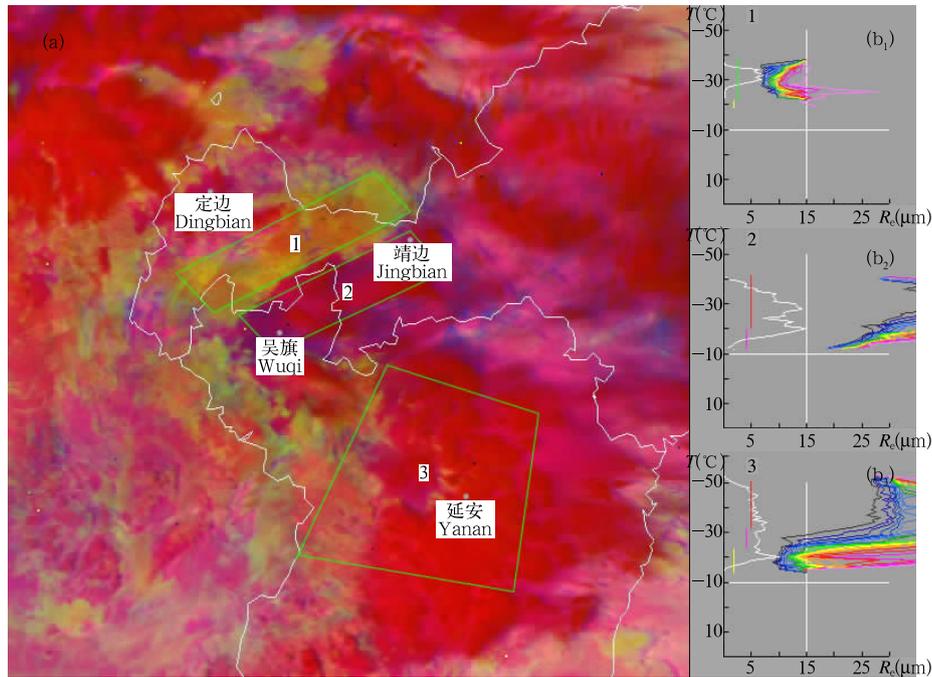


图2 2007年6月21日13时23分NOAA-18极轨卫星RGB合成图(a)和 $T-R_e$ 分析(b)(b_1-b_3 , $T-R_e$ 分析图对应

于图a中1、2、3区域,其中:左边白色曲线表征不同温度的云像元样本数,右边从左至右黑色、深蓝色、浅蓝、深绿色、绿色、黄色、橙色、红色、紫色、桃色曲线分别表示第10%到100%样本(间隔10%)的 R_e 随温度的变化曲线)

Fig. 2 RGB composite image from the data of NOAA-18 (a) and temperature (T) versus R_e (b) (the satellite overpassed on 13:23 BT 21 June 2007, the $T-R_e$ for the numbered frames in (a) are presented in the corresponding (b_1-b_3), in which the white curve represents the number of available sample, and the curves of black, navy blue, blue, bottle green, green, yellow, orange, red, purple and pink indicate variations of R_e with temperature for the available samples from 10 to 100% in the interval of 10%)

间)NOAA-18极轨卫星RGB合成图,线框1、2分别为白于山区地形云山前、山后云区。图中充满了红色、紫色、黄色的云,个别地方呈现出蓝色的地表。由图可见,区域1、2的黄色云区与红色云区分界线清晰,为东北—西南向,与白于山走向基本一致,结合延安、银川08时和20时的探空,白于山北坡为迎风坡(山前),南坡为背风坡(山后)。

众所周知,地形云中小云滴沿迎风坡不断爬升,如果从云底到云顶仅靠凝结增长,则云顶的滴较小,又因小滴不易冻结,即使在较低的温度下,短时间(从云底到云顶)形成的冰晶很少,导致山前云内存在丰富的过冷水。如果没有冰相或碰并过程参与,很难启动降水,云滴到达山顶后随气流移出云体蒸发,部分会滞留山后,通过冰相过程增长,在背风坡

下沉气流作用下,小滴蒸发,大滴降到地面,即地形云在山前新生山后成熟消亡。

图2 b_1-2b_3 分别为对应3个区域的云微物理结构 $T-R_e$ 图,由图可见,区域1黄色云区(山前)主体的 $T = -31^\circ\text{C}$, $R_e = 9\ \mu\text{m}$,与雾滴 $6-8\ \mu\text{m}$ 相当,很难克服上升气流降到地面,云区面积约 $4000\ \text{km}^2$ (对区域1进行地理投影后估算得到);区域2红色云区(山后)主体的 $T = -26^\circ\text{C}$, R_e 为 $35\ \mu\text{m}$ 以上,隐约可见蓝色的地表,云体较松散。表明山前云区缺乏冰晶并含有丰富过冷水,没有产生降水(观测表明无降水)。当持续地形抬升作用时,山前将不断新生地形云,而这类云的大部分云滴仅完成了一个从凝结到蒸发的过程,没有降到地面。结合冷云催化条件分析表明:地形云山前云区自然降水不充分、云

水较多且冰晶不足,具有较好的增雨潜力,如果在对山前云区连续实施冷云催化作业,可能会有效增加降水。

区域3为高、低云配置的云系,由区域3云微物理结构 $T-R_e$ 图可知,低云的 $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$,明显高于山前的云区,比山前云薄,云滴 R_e 为 $13\text{ }\mu\text{m}$ 左右,高云的 T 为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,云体发展很高很密实, R_e 大,云顶呈现出明显的冰晶化特征,从图像纹理可以看出,云体上部有较多直径 15 km 左右的对流泡生成,云顶发展不平衡。区域3的降水从12时开始并逐渐加强,6 h 降水 10 mm 左右。图中紫色表明 R_e 较大, T 较高。对比山前云区分析发现:虽然区域3中的低云比山前云区(黄色云区)要薄,但在高云的参与下(引晶作用),启动了降水过程,产生了较好的地面降水,因此,对山前云区实施增雨作业可望产生降水。图中的子午岭山区(区域3的左边)也有较多的黄色云区, $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$,这些云也存在增雨机会。

3.2 FY-2 静止卫星反演跟踪地形云演变

图3为FY-2C静止气象卫星反演的RGB合成图。采用与极轨卫星相同的反演方法和色彩组合,反演的区域、时间与图2相似,绿色线框与图2的区域1、2对应同一区域。由于FY-2静止卫星星下点分辨率为 5 km ,低于NOAA极轨卫星(分辨率 1.1 km),反演的多光谱图像较模糊,色彩层次相对要少。但是红色的冰云和黄色的过冷水云清晰可见。 $T-R_e$ 分析表明,绿色线框内黄色部位 T 约为

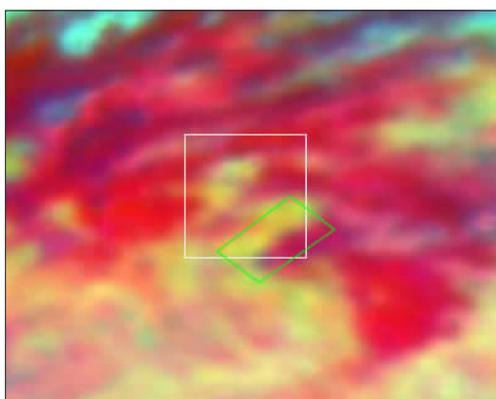


图3 2007年6月21日13时30分(北京时间)FY-2C静止卫星RGB合成图

Fig. 3 RGB composite image from the FY-2C geostationary satellite data at 13:30 BT 21 June 2007 (the areas framed by the green lines corresponds to the areas 1 and 2 in Fig. 2)

$-28\text{ }^{\circ}\text{C}$, R_e 为 $11\text{ }\mu\text{m}$ 左右,与极轨卫星反演的结果相当;红色部位 R_e 为 $24\text{ }\mu\text{m}$ 左右, $T = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,较过冷水云高约 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.3 云顶双参数的三维显示

图4为云顶双参数的三维显示(对应图3白色方框区域)。Z轴表示云顶亮温(T), T 越低云顶越高,曲面网的颜色从蓝到红表示 $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 反射率由高到低,即云顶 R_e 由小到大,反映云粒子的大小。从三维图形上可以看出,蓝色隆起的区域(椭圆指示区,对应图2的区域1)为正在形成和发展的水云, $T = -28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R_e = 11\text{ }\mu\text{m}$ 。利用FY-2C和FY-2D静止卫星每15 min一次探测跟踪山前云区的演变,图5为云顶双参数三维演示图,椭圆区为山前云区。对山前云区的跟踪分析表明:12时—14时45分, R_e 保持稳定,没有明显的增大和减小,即没有启动降水过程;12—13时云顶逐渐升高,云体增厚,13时—13时45分维持稳定,13时45分—14时45分逐渐降低,云体变薄。

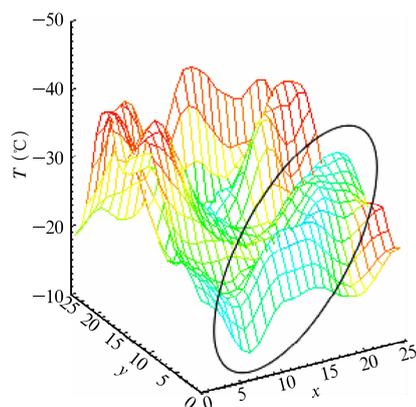


图4 FY-2C静止卫星云顶双参数的三维显示
Fig. 4 3-D display of the bi-parameters on the cloud tops for the area framed by the white line in Fig. 3 (the vertical axis represents the temperature, the x and y axes represent the number of pixels, and the colors from blue to red on the curved surface represent the increasing order of reflectance, reflecting the decreasing order of R_e)

通过静止卫星对山前云区的跟踪发现,云区维持3 h,保持相当厚度($T = -28\text{ }^{\circ}\text{C}$),没有降水产生,即山前云滴仅完成了一个从凝结到蒸发的过程,因此,对山前云区实施增雨作业是可以产生增雨效果的。

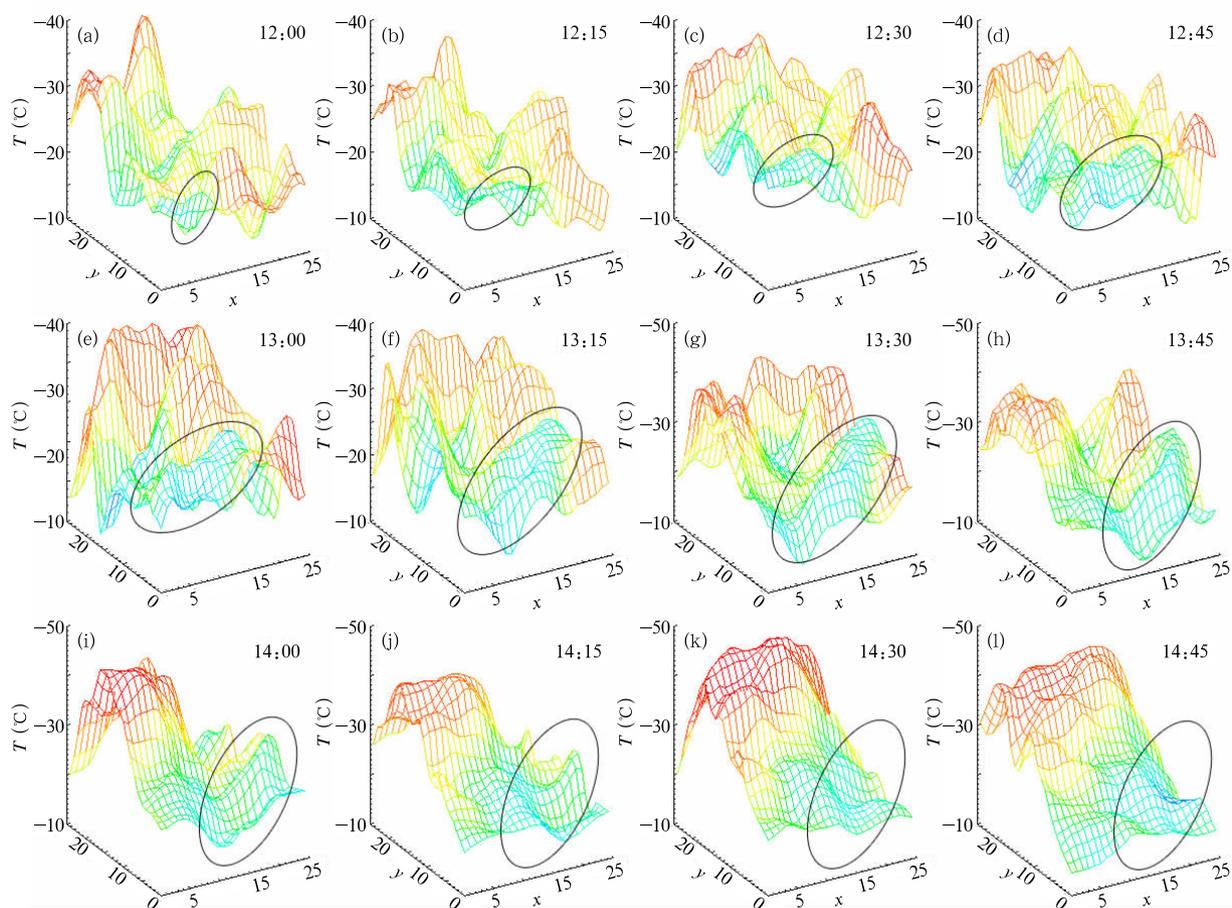


图5 静止卫星反演过冷云区 12 时—14 时 45 分间隔 15 min 演变的三维演示

Fig. 5 Evolution of the supercooled cloud in the time interval of 15 min during 12:00–14:45 BT as are shown by the 3-D display of the bi-parameters (the others are the same as in Fig. 4)

4 结 论

高空间分辨率的极轨卫星在分析云微物理结构上有相当的优势,而高时间分辨率的静止卫星在跟踪云的演变上也有相当的优势,两者的结合不仅提高了探测的时空分辨率,还丰富了对云探测的信息量,及时了解云发展状况。在人工增雨作业中,利用卫星技术分析云降水物理结构,跟踪发展演变,把握增雨时机部位指导作业,发挥卫星优势是一种值得尝试的方法。

本文选取 2007 年 6 月 21 日陕西白于山区地形云降水过程,用 NOAA-18 极轨卫星资料反演云微物理特征,分析表明山前云区的云顶亮温为 -31°C , R_e 为 $9\ \mu\text{m}$,云体密实,面积约 $4000\ \text{km}^2$,含有丰富过冷水,缺乏冰晶,观测无降水发生。而位于其南部

的 $T = -20^{\circ}\text{C}$ 的低云在有高云参与的情况下,6 h 降水 10 mm 左右,说明山前云区具备产生降水环境,只是缺乏冰晶(或大滴),为较好的增雨作业云区。利用 FY-2C 和 FY-2D 每 15 min 资料跟踪山前云区的发展演变,跟踪分析表明云区维持时间达 3 h,云体较厚, R_e 稳定,没有降水产生,说明这类云在自然发展过程中不能形成降水,大部分云滴仅完成了一个从凝结到蒸发的过程。综合分析表明如果对山前云区实施连续的冷云催化作业,可望有效增加降水。

参考文献

- 戴进, 余兴, Rosenfeld 等. 2006. 一次过冷层状云催化云迹微物理特征的卫星遥感分析. 气象学报, 64(5): 622-630
- 胡志晋. 2001. 层状云人工增雨机制条件和方法的探讨. 应用气象学报, 12(增刊): 10-13
- 刘贵华, 余兴, 戴进. 2009. 不同积云微物理特征的卫星反演分析. 南京气象学院学报, 32(1): 101-107

- 刘健,许健民,方宗义. 1998. 利用 NOAA 卫星 AVHRR 资料分析云的性质. 应用气象学报, 9: 449-455
- 刘健,董超华,张文健. 2003. 利用 FY-1C 资料反演水云的光学厚度和粒子有效半径. 红外与毫米波学报, 22: 436-440
- 刘文. 2005. 用极轨气象卫星资料分析飞机增雨云层条件. 气象科技, 1: 81-86
- 赵凤生,丁强,孙同明等. 2002. 利用 NOAA-AVHRR 观测数据反演云辐射特性的一种迭代方法. 气象学报, 60: 594-601
- Arking A, Childs J D. 1985. Retrieval of cloud cover parameters from multispectral satellite images. J Climate Appl Meteor, 24: 322-333
- Baum B A, Spinhirne J D. 2000. Remote sensing of cloud properties using MODIS airborne simulator imagery during SUCCESS 3. Cloud overlap. J Geophys Res, 105: 11793-11804
- Grant L O, Elliott R E. 1974. The cloud seeding temperature window. J Appl Meteor, 13(3): 355-363
- Han Q, Rossow W B, Lacis A A. 1994. Near-global survey of effective droplet radii in liquid water clouds using ISCCP data. J Climate, 7: 465-497
- Hudak D R, List R. 1988. Precipitation development in natural and seeded cumulus clouds in southern Africa. J Appl Meteor, 27(6): 734-756
- Key J R, Intrieri J M. 2000. Cloud particle phase determination with AVHRR. J Appl Meteor, 39: 1797-1804
- Lensky I M, Rosenfeld D. 2006. The time-space exchangeability of satellite retrieved relations between cloud top temperature and particle effective radius. Atmos Chem Phys, 6: 2887-2894
- Nakajima T Y, Nakajima T. 1995. Wide area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurements for FIR and ASTEX regions. J Atmos Sci, 52: 4043-4059
- Pavolonis M J, Heidinger A K, Uttal T. 2005. Daytime global cloud typing from AVHRR and VIIRS: Algorithm description, validation, and comparisons. J Appl Meteor, 44: 804-826
- Rokicki M L, Young K C. 1978. The initiation of precipitation in updrafts. J Appl Meteor, 17(6): 745-754
- Rosenfeld D, Lensky I M. 1998. Spaceborne sensed insights into precipitation formation processes in continental and maritime clouds. Bull Amer Meteor Soc, 79: 2457-2476
- Rosenfeld D. 1999. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall. Geophys Res Lett, 26: 3105-3108
- Rosenfeld D. 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. Science, 287: 1793-1796
- Rudich Y, Khersonsky O, Rosenfeld D. 2002. Treating clouds with a grain of salt. Geophys Res Lett, 29: 2060-2064
- Strabala K I, Ackerman S A, Menzel W P. 1994. Cloud properties inferred from 8 - 12 μm data. J Appl Meteor, 33: 212-229