

# 人工消(减)雨作业中卫星反演云特征参量变化

李宏宇<sup>1</sup> 周 兔<sup>1</sup> 周毓荃<sup>2</sup>

(1. 北京市人工影响天气办公室, 100089; 2. 国家气象中心)

**提 要:** 利用 FY-2C 静止卫星资料反演的云物理宏微观特征参数初步分析了北京 2008 年奥运会开幕式期间地面火箭消(减)雨作业的物理响应。对 8 月 8 日夜间作业较集中时段的云顶高度、液水路径和云粒子有效半径三个云参量的变化分析显示, 地面大规模火箭作业对减弱或抑制云降水的形成和发展起到了一定作用。火箭作业及其携带入云的碘化银引晶作用, 使作业区附近云顶高度明显下降, 云体发展受到抑制; 液水路径减少很多, 表明空中云液水尤其是过冷水被大量转化。此外, 过量引晶也促使作业区附近云粒子有效半径明显减小, 不利于降水的形成。

**关键词:** 人工消(减)雨 卫星反演 云参量

## 引 言

云的一些物理参数如云顶高度, 云粒子有效半径等是反映云的发展状况的重要指标, 对云的各种宏微观物理参数的了解也是人工影响天气作业设计和效果检验的一个重要因素。如何及时准确地得到云的这些物理特征信息, 为众多学者所研究。也日益受到人们的关注。

在云和降水物理观测研究中, 气象卫星遥感作为一种重要的观测手段, 以其独特的空对地观测对原有的传统地面观测方式提供了强有力的补充。卫星观测资料包含了较为丰富的云辐射特性的空间和时间变化信息, 利用卫星资料遥感的云体特征具有其它探测手段不可比拟的大范围、全过程观测的优点。目前, 利用各种卫星资料提取云参数的研究

工作较多<sup>[1-2]</sup>。极轨卫星空间分辨率较高, 但对于人工影响天气来说其时间分辨率太低。静止卫星高时间分辨率的观测资料能够很快监测到云的变化, 可在人工影响天气的作业效果检验中得到应用。

本文利用奥运期间国家气象中心安装在北京市人工影响天气作业指挥中心的“FY-2C 静止卫星云物理特征参数反演系统”现场运行得到的部分云物理特征产品, 即云顶高度、液水路径和粒子有效半径三个云宏观参量的变化, 来探寻 2008 年奥运会开幕式期间北京市西南方向地面火箭大规模作业的物理响应, 并初步检验人工消(减)雨作业的效果。

## 1 卫星反演云参量简介

### 1.1 FY-2C 卫星资料

FY-2C 静止轨道气象卫星可获取白天可

见光云图、昼夜红外云图和水汽云图,收集气象、海洋、水文等观测数据,播发展宽数字图像、低速率云图资料,监测空间环境数据等,可对台风、降水、海温、云层、太阳辐射、空间粒子辐射等进行定量监测。FY-2C 卫星主要有效载荷为红外和可见光自旋扫描辐射器 VISSR,其技术指标如表 1 所示。

表 1 FY-2C 扫描辐射计主要技术指标

通道	波段/ $\mu\text{m}$	星下点分辨率/km	用途
可见光	0.55 ~ 0.90	1.25km	白天的云、雪、水体
红外 1	10.3 ~ 11.3	5km	昼夜云、下垫面温度、云雪区分
红外 2	11.5 ~ 12.5	5km	昼夜云
红外 3	6.3 ~ 7.6	5km	半透明卷云的云顶温度、中高层水汽
红外 4	3.5 ~ 4.0	5km	昼夜云、高温目标

文中使用的 FY-2C 资料,为在北京局实时接收并处理的等经纬网卫星数据,资料覆盖范围为  $0 \sim 60^\circ\text{N}, 70^\circ \sim 150^\circ\text{E}$ , 分辨率统一为  $0.05^\circ$ 。

## 1.2 云参量反演方法

国家气象中心人工影响天气服务室目前已发布多种 FY-2C 卫星反演云宏观物理特征参数<sup>[3,4]</sup>。为满足奥运人工消减雨的特殊需要,在发布常规产品的基础上,奥运前期在北京人影指挥中心移植开发安装运行了新的反演系统,并增加了液水路径等新的参量。这里主要利用现场实时运行得到的产品,选取云顶高度、云粒子有效半径和液水路径三个云参量,分别从云体宏观特征、云微观特征和云内液水的变化来探寻碘化银过量引晶作业可能的物理响应。

### 1.2.1 云顶高度 ZTOP

根据平面平行辐射传输模式<sup>[5]</sup>得到云顶温度、高度及云粒子有效半径这几个云物理参量与卫星两个红外通道的亮度温度的相关关系,并结合重复调用辐射模式的迭代法得到云顶高度、温度以及云有效粒子半径。各个有效粒子半径时温度差值随云顶高度变

化的关系式为:

$$\text{通道 1: } T_{top} - Tb_1 = a_1 \log(H) + b_1 \quad (1)$$

$$\text{通道 2: } T_{top} - Tb_2 = a_2 \log(H) + b_2 \quad (2)$$

式中, $Tb_1, Tb_2$  为红外 1、2 通道的亮温; $T_{top}$  为云顶温度; $H$  为云顶高度; $a_1, a_2, b_1, b_2$  分别为云粒子有效半径的函数。为提高反演精度,实时多站探空资料建立的温度和高度间相关关系参与反演计算<sup>[6]</sup>,表达式为:

$$T_{top} = a_4 H + b_4 \quad (3)$$

根据读取的探空资料各层温度和高度值,利用最小二乘法求出  $a_4$  和  $b_4$  的值,其

$$\text{中, } a_4 = \frac{n \sum HT_{top} - \sum H \sum T_{top}}{n \sum H^2 - (\sum H)^2}, \quad b_4 = \bar{T}_{top}$$

$- a_4 \bar{H}$ ,联合上述三个方程求解,迭代计算便可得到云顶温度和云顶高度的初步计算值。

### 1.2.2 粒子有效半径 REF

对于非守恒散射情况,云顶的反射函数为:

$$R(\tau_c; \mu, \mu_0, \phi) = R_\infty(\mu, \mu_0, \phi) - \\ m[(1 - A_g A^*)l - A_g m n^2] K(\mu) K(\mu_0) e^{-2k\tau_c} \\ -(1 - A_g A^*)(1 - l^2 e^{-2k\tau_c}) + A_g m n^2 l e^{-2k\tau_c} \quad (4)$$

式中, $R_\infty(\mu, \mu_0, \phi)$  是半无限大气的反射函数, $K(\mu)$  是逸出函数。 $k$  是一个描述漫散射辐射衰减的指数, $m$  和  $l$  是依赖于单次散射反照率和不对称因子的常数,它们可通过拟合方法决定。从上式可见,在水汽吸收波段反射函数  $R$  除了与  $R_\infty, A_g, K(\mu), \tau_c$  相关外,还与  $k, A^*, m, n, l$  五个常数相关,这五个参数可综合用相似性参数  $s$  表示, $s$  主要与  $r_e$  有关,因此,在  $R_\infty, A_g, K(\mu), \tau_c$  可近似确定的情况下,同样能够建立有效粒子半径  $r_e$  与反射函数测量  $R$  值的对应关系。

### 1.2.3 液水路径 LWP

单位面积上液水总量,即云液水路径 ( $LWP$ ),由云光学厚度  $\tau$  和粒子有效半径  $r_e$  两个参数来控制,可经公式(5)计算:

$$LWP = \frac{2\tau\rho_w r_e}{3} \quad (5)$$

当光学厚度足够大并且反射辐射场为各向同性时,云层的反射函数可以用渐近式表示。守恒散射情况下有:

$$R(\tau_c; \mu, \mu_0, \phi) = R_\infty(\mu, \mu_0, \phi) - \frac{4(1 - A_g)K(\mu)K(\mu_0)}{3(1 - A_g)(1 - g)(\tau_c + 2q_0) + 4A_g} \quad (6)$$

式中,  $q_0$  是对于守恒散射的外推长度,  $g$  为非对称因子,  $q' = (1 - g)q_0$  是还原外推长度。可以看出, 在非水汽吸收波段, 尺度化的光学厚度  $\tau'_c$  与  $q', A_g, K(\mu)$  以及测量辐射与大气辐射间的差相关。因此, 在  $q', A_g, K(\mu)$  以及  $R_\infty$  可以近似确定的情况下, 能够建立尺度化的光学厚度  $\tau'_c$  与非吸收波段的反射函数测量值  $R$  的对应关系。

## 2 天气背景与地面作业情况

### 2.1 云和降水监测

8月8日上午, 河套地区形成的降雨云系不断加强并向北京进发。从中午开始一连串强对流暴雨云带自西南方向逐渐向北京城区移近。下午, 北京周边强对流云发展旺盛, 逐渐向城区逼近。20时30分, 不断冒泡的降雨云团从东北和西南两个方向影响北京郊区, 并向城区合围。密云县境内出现雷电, 城区五棵松一带开始飘雨; 21时35分气象监测显示, 西南方向河北保定地区出现超强对

流云团、顶高接近20km, 且向其东北方的北京市房山区移近。此外, 门头沟、顺义、密云等区(县)也出现较强局地对流云团。

### 2.2 地面作业信息

根据北京2008年奥运会开闭幕式人工消(减)雨作业实施方案, 经科学设计在北京市西北、正西、西南、正南、东南、东北六个方向分别设立有多道空中与地面作业防线。西南方向的第一道防线位于河北省保定地区, 主要负责对云和降水实施人工增雨提前降水作业, 西南方向第二道防线则位于北京市房山区境内, 主要担负对进入防区内的云和降水实施过量播撒作业。

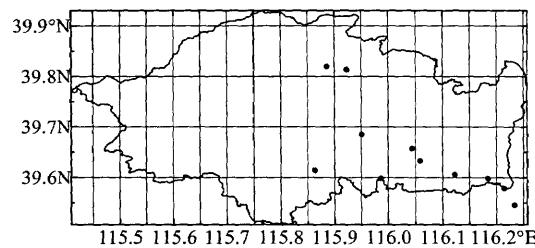


图1 北京市房山区地面临时火箭作业点分布

图1给出了房山区境内临时建立的佛子庄、岳各庄等11个流动火箭点分布。作业使用的RYI-6300专用型增雨防雹火箭弹每枚携带碘化银催化剂25克。

表2 西南方向作业集中时段地面火箭作业详情

	保定地区		门头沟区		房山区	
	火箭点数(个)	作业用量(枚)	火箭点数(个)	作业用量(枚)	火箭点数(个)	作业用量(枚)
19:38—19:40	2	10				
20:03—20:18	2	12			10	90
20:53—21:05					1	15
21:15—21:25					2	30
21:28—21:34			4	36		
21:45—22:03			4	48	10	144
22:03—22:20			4	36	10	138
22:25—22:45	2	11			7	108
22:58—23:10					5	75

根据云(系)发生发展情况, 8月8日从

16时08分开始, 北京市人工影响天气办公

室分别组织西北、正西和西南三个方向作业防线内地面火箭作业点对对流云团实施拦截。针对西南方向较强对流云团的地面主要作业信息详见表2。可以看到,随着西南方向对流云团的移近,地面火箭拦截作业集中于20时53分至22时45分。两个小时之内,仅房山区一道防线共发射专用火箭弹435枚,接近整个过程作业总量的半数。

### 3 云参量变化分析

#### 3.1 云顶高度变化

卫星反演的云顶高度分布显示,8月8日夜间18时至23时北京市周边地区存在较强的对流云团,尤其西南和东部地区云体发展较为旺盛。西南方向河北省保定地区境内对流云团顶高在10km以上,并且向东北向往北京市房山区逐渐逼近。另外,北京市东部和东北部密云县、平谷区、顺义区一带云顶高度也接近10km,云团移动缓慢且有向城区推进趋势。

图2(见彩图第15页)云顶高度随时间的变化显示,21时01分至22时33分北京市西部出现大范围云层,自西向东移近中云顶高度有所加强,使得北京市门头沟和房山区上空很快充满5~6km高的云体。而顶高大于7km的较强云团在移进房山区后没有继续北伸,转而向南收缩逐渐移出北京市。

表2 不同时刻云顶高度 H

时刻	21:01	21:33	22:01	22:33
H/km	6490	6390	4120	5400

由图2c可以注意到,22时在房山区南侧出现一个非常明显的云空隙,对应于地面火箭作业点西侧上空云顶高度骤降。选取格点P(115.70°E, 39.65°N)以其为中心并在其南北、东西向再各选取两个格点对云顶高度作五点算术平均来看,21时33分对应P位置的云顶高度较半小时前变化不大,微弱

降低100m,而至22时,顶高降低幅度达2270m,云体显著减弱。之后,随着西侧云团的移进,云体顶高又略有升高。

#### 3.2 液水路径变化

图3(见彩图第15页)卫星反演的液水路径和云顶高度分布基本一致。对应北京市西南部、东部以及北部较强云团都存在液水路径或云液水含量较大的区域。较高的云体和液水路径以及傍晚时分飞机西部探测均表明云团内过冷水含量也较为充沛。

从液水路径分布随时间的变化来看,21时之后的半小时,北京市西部和西南部云液水路径均有所增加,尤其是房山区南侧存在旺盛云体,房山区境内很大部分区域液水路径达0.4~0.8mm,丰富的云液水含量较利于降水的形成和发展。而至22时左右,在房山区南侧出现了液水路径骤减区,对应地面火箭作业点附近空中云液水量明显减少。从表3对应选取的P位置液水路径变化看,经过略微增加后21时30分左右该位置液水路径为0.51mm,之后半小时则明显减少,到了22时仅有0.29mm,不利于降水。

表3 不同时刻液水路径 LWP

时刻	21:01	21:33	22:01	22:33
液水路径/mm	0.42	0.51	0.29	0.49

此外,靠近房山区南侧的高云液水路径和较强云团,在进入房山区境内后也没有北进发展,而是逐渐转向东南,减弱偏离北京市。

#### 3.3 粒子有效半径变化

地面火箭作业将携带的大量碘化银催化剂播撒入云,这些人工冰核遇到过冷水后能够形成大量的小冰晶,继而参与并影响云降水过程。从图4(见彩图第16页)可以看出卫星反演的北京市西部云层粒子尺寸总体偏小,卫星反演的粒子有效半径集中在14μm左右,加上云顶不高,不利于形成降水。而西

南部较强对流云团粒子有效半径大多集中在20几 $\mu\text{m}$ ,尺寸较大的约30 $\mu\text{m}$ ,较利于降水形成和发展。

随着西部和西南部云体的不断移近,房山区上空很快即布满云层。21时30分房山区南侧云粒子尺寸较前半小时又有所增大,之后则趋于减小。而在图4c地面火箭点位置及其附近容易看到存在一些有效半径较小分布区域,云粒子尺寸普遍低于15 $\mu\text{m}$ 。

表4 不同时刻粒子有效半径 REF

时刻	21:01	21:33	22:01	22:33
粒子有效半径/ $\mu\text{m}$	26.4	26.5	11.5	12.5

选取的P位置云粒子有效半径在21时和其后的半小时变化很小,均大于25 $\mu\text{m}$ 。而到了22时,对该位置上空的粒子有效半径降至11.5 $\mu\text{m}$ ,尺寸明显减小,这可能跟碘化银过量引晶作业在云内生成大量的小冰晶有关。

#### 4 小结

利用FY-2C静止卫星资料反演的云顶高度、液水路径和粒子有效半径三个云参数变化,初步分析北京2008年奥运会开幕式期间地面火箭消(减)雨作业的物理响应,结果显示:

火箭作业及携带入云的碘化银过量引晶

造成了作业区附近云顶高度明显下降,云体发展受到抑制;卫星反演的液水路径减少很多,表明空中云液水尤其是过冷水被大量地转化。此外,作业区附近上空云粒子有效半径明显减小,平均低于15 $\mu\text{m}$ ,不利于降水的发生,同时这也跟碘化银过量引晶在云内形成了大量的小冰晶有关。

#### 参考文献

- [1] 刘健,董超华,张文建.利用FY21C资料反演水云的光学厚度和粒子有效半径[J].红外与毫米波学报,2003,22:436-440.
- [2] Rosenfeld, D., W. L. Woodley, A. Lerner, et al (2008), Satellite detection of severe convective storms by their retrieved vertical profiles of cloud particle effective radius and thermodynamic phase[J]. J. Geophys. Res., 113, D04208, doi:10.1029/2007JD008600.
- [3] 陈英英,周毓荃,毛节泰,等.利用FY-2C静止卫星资料反演云粒子有效半径的试验研究[J].气象,2007,33(4):29-34.
- [4] 周毓荃,陈英英,李娟,等.利用FY-2CD静止卫星等综合观测资料联合反演云宏微观物理特性参数产品及初步检验[J].气象,2008,34(12):29-39.
- [5] Paul Ricchiazzi, Shiren Yang, Catherine Gautier, et al. SBDART: A Research and Teaching Software Tool for Plane-Parallel Radiative Transfer in the Earth's atmosphere[J]. Bull. Ameri. Meteor. Soc., 1998, 79: 2101-2114.
- [6] 黄毅梅.卫星反演云物理参数研究及其在人工影响天气中的应用[J].兰州大学,2006.