

周非非,周毓荃,王俊,等. FY-2 卫星反演的云顶高度与多普勒雷达回波顶高的关系初探[J]. 气象, 2010, 36(4): 43-50

## FY-2 卫星反演的云顶高度与 多普勒雷达回波顶高的关系初探<sup>\*1</sup>

周非非<sup>1</sup> 周毓荃<sup>2</sup> 王 俊<sup>3</sup> 何正梅<sup>4</sup>

1 国家气象中心, 北京 100081

2 中国气象科学研究院人工影响天气中心, 北京 100081

3 山东省人工影响天气办公室, 济南 250031

4 山西省大同市气象台, 大同 037010

**提 要:** 对主要用 FY-2C/D 卫星并融合其他观测资料反演的云顶高度与多普勒雷达回波顶高的关系作了初步探讨。通过对 20 个主要由积层混合云和层状云造成的降水个例总数万个样本的统计分析表明, 卫星反演云顶高与 SA 型号雷达回波顶高存在较好的正相关关系, 两者的关系对组合反射率因子的大小不敏感。卫星反演云顶高与小于 18 dBz 反射率因子对应的回波顶高比与 18 dBz 回波顶高更接近, 这主要是由于 FY-2C/D 卫星和 SA 型号雷达探测和反演的原理不同造成, 卫星云顶高反映的是积层混合云和层状云顶部云粒子的辐射特性, 而回波顶高体现的主要是云中下部较大降水粒子对雷达电磁波的衰减。

**关键词:** FY-2 卫星, 云顶高度, 雷达回波顶高

## Relationship of Cloud-Top Heights Retrieved from Combination of FY-2C/D Geostationary Satellite Data and Other Observation Data and Radar-Retrieved Echo Tops

ZHOU Feifei<sup>1</sup> ZHOU Yuquan<sup>2</sup> WANG Jun<sup>3</sup> HE Zhengmei<sup>4</sup>

1 National Meteorological Center, Beijing 100081

2 Weather Modification Center, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031

4 Datong Meteorological Observatory, Datong 037010

**Abstract:** A relationship between cloud-top heights retrieved from combination of FY-2C/D geostationary satellite data and other observation data and radar-derived echo-tops is investigated. Tens of thousands of samples from 20 precipitation cases caused by cumuliform-stratiform-mixed and stratiform clouds are evaluated. It shows that there is remarkably a positive correlation relationship between satellite-derived cloud-top-height and radar echo-top. It is likely that the relationship is hardly dependent upon combined reflectivity factor. Cloud-top heights mainly derived by FY-2 are more consistent with echo tops of less than 18 dBz reflectivity factor, compared with those of 18 dBz reflectivity factor because FY-2 satellites and SA-type-radars have different observational and retrieval principles. Satellite-derived cloud-top-height represents radiation characteristics of cloud droplets in the top of cumuliform-stratiform-mixed and stratiform clouds, and meanwhile radar-retrieved echo-top implies ability that larger precipitation particles attenuate electromagnetic waves of radars.

**Key words:** FY-2 satellites, cloud-top heights, echo tops

\* 国家“十一五”科技支撑课题“人工增雨信息处理技术研究”(2006BAC12B07), 中国气象局 2009 年新技术推广项目 (CMATG2009MS09) 和山东省气象局 2006 年重点课题“国家级人影业务指导产品的本地化释用”(2006sdqxz19) 共同资助  
2009 年 1 月 6 日收稿; 2009 年 7 月 30 日收修定稿  
第一作者: 周非非, 主要从事云降水物理研究. Email: zhouff770215@163.com

## 引言

为定量分析云降水物理特征,国家气象中心基于 FY-2C/D 静止卫星遥感观测,融合探空等其他观测资料,研发了近 10 种云宏微观物理特性参数的反演方法,并实现业务化运行<sup>[1]</sup>。这套反演算法主要来源于李娟等<sup>[2]</sup>利用 GMS-5 静止卫星对云物理特性的反演和随后周毓荃等<sup>[1]</sup>和陈英英等<sup>[3]</sup>对 FY-2 卫星的一系列工作。其中反演云顶高度的主要原理是:静止卫星的两个红外通道为大气窗区,对于较厚可视为黑体的云测得的亮度温度与云顶温度很接近。利用 SBDART 辐射传输模式可算得当云层柱含水量为  $200\sim 2000\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  时,在不同粒子有效半径情况下,亮度温度基本达到一个稳定值,云的性质接近于黑体,可见亮度温度对云层柱含水量的大小不敏感,并且两个红外通道的亮度温度与云顶温度的差值随着云有效粒子半径和云顶高度的变化都可以拟合为式(1)和式(2)。式(1)和式(2)中,  $T_{b_1}$  和  $T_{b_2}$  为卫星测量的亮度温度,  $T_{\text{top}}$  为云顶温度,  $H$  为云顶高度,  $a_1, b_1, a_2$  和  $b_2$  分别为云有效粒子半径的函数。由式(1)和(2)的联合求解,可得到云顶高度和云有效粒子半径两个参数。

$$T_{\text{top}} - T_{b_1} = a_1 \lg H + b_1 \quad (1)$$

$$\lg(T_{\text{top}} - T_{b_2}) = a_2 \lg H + b_2 \quad (2)$$

目前已陆续在主要用 FY-2C/D 卫星反演的云物理特性产品的检验方面开展了一些工作。例如陈英英等<sup>[3]</sup>利用 FY-2 卫星对有效粒子半径敏感的中红外通道  $4(3.5\sim 4.0\ \mu\text{m})$  并结合其他通道数据,采用 SBDART 辐射传输模式改进了对云粒子有效半径的反演,与 MODIS 的初步对比可见 FY-2 和 MODIS 能够一致地反映云有效半径分布的主要特征。陈英英等<sup>[4]</sup>对几个降水个例 FY-2 反演的云液水路径与同时段地面加密雨量的对比表明,云液水路径的大值区与强降水中心的位置基本一致,云液水路径的大小与地面雨量的大小呈现正相关关系。周毓荃等<sup>[1]</sup>将反演的云顶高与 CLOUDSAT 云雷达的简单对比表明两者具有较好的一致性。唐仁茂等<sup>[5]</sup>指出 FY-2C 卫星反演的云参数产品显示催化后较之作业前云顶高度上升,云顶温度降低,过冷层厚度增大,有效粒子半径维持大粒子水平。国外一些研究人员对于静止卫星反演的云顶高度与雷达云顶高作的对比较多。例如, Hawkinson 等<sup>[6]</sup>对两年

GOES 卫星反演的云顶高度与地基云激光雷达和雷达联合反演的云顶高度作了对比,结果表明两者有  $1772\text{ m}$  的平均偏差和  $1733\text{ m}$  的标准差,其偏差有  $22\%$  落在  $\pm 500\text{ m}$  内,  $56\%$  在  $\pm 1500\text{ m}$  以内。Mace 等<sup>[7]</sup>发现 MODIS 卫星反演的薄卷云云顶高度比地基云雷达反演的持续偏低数百米,这一偏差与 MODIS 采用的  $\text{CO}_2$  薄片算法有关。

卫星和雷达都是云降水监测的重要工具,目前利用雷达等地基探测仪器研究云参数的发展很快<sup>[8]</sup>,包括回波顶(等值线)在内的主要物理量已经成为我国新一代天气雷达的常规业务产品<sup>[9]</sup>。已设计实现的雷达三维数字组网软件系统生成的回波顶高等二次产品应用将更广泛<sup>[10]</sup>。卫星反演云顶高和雷达回波顶高因为探测和反演算法的精度和误差而存在不确定性,它们也都是反映云降水系统强弱变化的参数,因而又存在一定联系。当云的类型和相应的雨强不同时(如以组合反射率因子分类),当雷达型号不同时,对 FY-2 静止卫星反演的云顶高度与雷达回波顶高之间关系的对比和探讨,既能相互印证和校验,又能了解目前 S 波段天气雷达对云的探测能力,进而也有助于进一步认识云的特点。

## 1 资料个例和数据处理方法

### 1.1 选取的个例简介

选取的降水过程列在表 1 中,共包含 2005—2007 年 6 部多普勒雷达对 20 个降水个例的观测,所用的雷达包括 CINRAD-SC 和 CINRAD-SA 两种型号,降水云以积层混合云和层状云为主。

### 1.2 确定雷达回波顶高及转换处理

通过读取多普勒雷达基数据进而计算回波顶高采用如下方法:首先,沿某一径向,从距雷达站由远及近地依次读取反射率因子数据,当某一距离库的反射率因子小于某一阈值(分别取  $18\text{ dBz}$  和  $1\text{ dBz}$  以及  $-10\text{ dBz}$ ),且相邻下一距离库的反射率因子大于该阈值时,找出这一距离库。然后,利用该距离库库数和库长以及仰角等,根据测高公式<sup>[11]</sup>算出该阈值回波强度对应的高度。由于目前雷达回波顶高产品通常给出的是  $18\text{ dBz}$  阈值对应的回波高度<sup>[9]</sup>,为了分析不同反射率因子阈值同卫星云顶高度的关系,分别取  $18\text{ dBz}$  和  $1\text{ dBz}$  以及  $-10\text{ dBz}$  反射率因子作为阈值回波强度,它们对应的回波顶高分别称

表 1 降水个例简介

Table 1 Description of precipitation cases

时间	雷达站	降水云类型
2005 年 6 月 26 日	滨州 SC 雷达	层状云
2005 年 6 月 25—26 日	合肥 SA 雷达	积层混合云
2005 年 9 月 19 日	滨州 SC 雷达	以层状云为主的积层混合云
2006 年 4 月 1 日	天津塘沽 SA 雷达	积层混合云
2006 年 4 月 3 日	临沂 SC 雷达	积层混合层
2006 年 4 月 3—4 日	连云港 SA 雷达	积层混合云
2006 年 4 月 5 日	天津塘沽 SA 雷达	层状云为主
2006 年 5 月 21 日	滨州 SC 雷达	以层状云为主的积层混合层
2006 年 5 月 26 日	滨州 SC 雷达	积层混合云
2006 年 8 月 30—31 日	滨州 SC 雷达	积层混合云
2006 年 8 月 30—31 日	济南 SA 雷达	层状云为主
2006 年 9 月 4 日	滨州 SC 雷达	积层混合云
2007 年 4 月 14—15 日	济南 SA 雷达	积层混合云
2007 年 5 月 11 日	济南 SA 雷达	积层混合云 和层状云
2007 年 5 月 22 日	济南 SA 雷达	积层混合云
2007 年 5 月 24 日	济南 SA 雷达	积层混合云
2007 年 6 月 29—30 日	济南 SA 雷达	对流云转积层混合云
2007 年 9 月 27—30 日	济南 SA 雷达	积层混合云
2007 年 10 月 3—4 日	济南 SA 雷达	积层混合云
2007 年 10 月 9—10 日	济南 SA 雷达	层状云转积层混合云

为 18 dBz 回波顶高和 1 dBz 回波顶高以及  $-10$  dBz 回波顶高。

显然用雷达体积扫描资料按上述算法得到的回波顶高的分辨率比卫星反演的云顶高度  $0.1^\circ$  分辨率要高得多。为了解决两者分辨率不匹配的问题, 对算得的雷达回波顶高作以下转换处理。首先, 将对范围限定在以雷达站为中心, 边长为  $300$  km 的体积内; 然后, 在如图 1 所示的单位格距范围内, 对所求的  $18$  dBz ( $1$  dBz 和  $-10$  dBz) 回波顶高取最大值, 把所取的最大值视为  $(i, j)$  格点上的回波顶高。

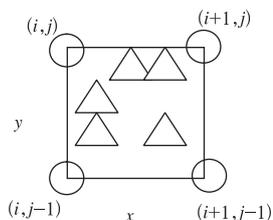


图 1 格点分布示意图

( $\circ$ ) 代表卫星反演云顶高, ( $\triangle$ ) 代表雷达回波顶高)

Fig. 1 Schematic of grid distribution

( $\circ$ ) means satellite-derived cloud-top-height,

$\triangle$  means radar-echo-top)

之所以对回波顶高取最大值而不取平均值是由于首先取最大值与取平均值对后文分析结果的影响不大, 其次目前天气雷达产品中反射率因子和组合反射率因子以及回波顶高取的都是最大值。图 1 四个角上的格点代表卫星反演的云顶高度, 这样就得到了与卫星云顶高分辨率一致的回波顶高数据。在时间上尽可能选取跟卫星观测时间最接近的雷达数据, 保证两者的时间差不超过 6 分钟。文中所用时间均为北京时。

## 2 结果分析

对于表 1 所列个例将卫星反演的云顶高度与算得的雷达回波顶高, 首先按照不同型号雷达作了区分。结果发现, 卫星云顶高与 SC 型号雷达  $18$  dBz 和  $1$  dBz 回波顶高(总共 14492 个样本)的相关系数分别为  $0.28$  和  $0.38$ , 卫星云顶高相对于 SC 型雷达  $18$  dBz 和  $1$  dBz 回波顶高的绝对偏差的平均值分别为  $2.69$  km 和  $2.05$  km; 卫星云顶高与 SC 型雷达回波顶高的差值落在大于  $0$  km 的样本数明显多于其差值小于  $0$  km 的数目, 卫星云顶高与 SC 型雷达  $18$  dBz 和  $1$  dBz 回波顶高的差值在  $\pm 2$  km 之内的样本数分别约占  $32.1\%$  和  $43.8\%$ 。对于 SA 型号雷达回波顶高和卫星反演云顶高(总共 24158 个样本), 由于所研究个例几乎都为积层混合云或层状云, 因而以  $30$  dBz 组合反射率因子对回波顶高作了区分, 以下将分别分析当组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时和组合反射率因子  $< 30$  dBz 时 SA 型雷达  $18$  dBz、 $1$  dBz 和  $-10$  dBz 反射率因子对应的回波顶高与卫星反演云顶高的关系。

### 2.1 卫星反演云顶高与当组合反射率因子 $\geq 30$ dBz 时 SA 型号雷达回波顶高的关系

表 2 列出了对表 1 中个例卫星反演云顶高(用 FY-2C CTOP 表示)与当组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时 SA 型号雷达  $18$  dBz 回波顶高(用  $18$  dBz ET 表示)和  $1$  dBz 回波顶高(用  $1$  dBz ET 表示)以及  $-10$  dBz 回波顶高(用  $-10$  dBz ET 表示)总共 11499 个样本数算得的一些常用统计量。由表 2 可见, 当组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时, 从卫星反演云顶高和  $18$  dBz 回波顶高以及两者绝对偏差的算术平均值和分位数能看出卫星云顶高普遍较  $18$  dBz 回波顶高偏大的趋势。对比卫星反演云顶高与  $18$  dBz、 $1$  dBz

和-10 dBz 回波顶高及其绝对偏差的统计值,发现卫星云顶高与 1 dBz 回波顶高最接近。另外,从卫星反演云顶高与-10 dBz 回波顶高的统计值对比可看出卫星云顶高具有较-10 dBz 回波顶高偏低的趋势。

图2a、图2b、图2c分别给出了卫星反演云顶高与

表 2 卫星反演的云顶高度与当组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时 SA 型雷达回波顶高的对比统计(单位:km)  
Table 2 Comparison of statistics between satellite-derived cloud-top-height and SA-radar echo-top when composite reflectivity  $\geq 30$  dBz (units: km)

	算术 平均值	25% 分位数	中位数	75% 分位数	标准差
FY-2C CTOP	7.55	5.95	7.45	9.90	2.17
18 dBz ET	5.58	4.08	5.68	7.30	2.69
1 dBz ET	8.34	6.58	7.98	10.04	2.66
-10 dBz ET	9.20	7.28	8.74	10.87	2.65
FY-2C CTOP 与 18 dBz ET 的绝对偏差	2.38	0.78	1.76	3.31	2.15
FY-2C CTOP 与 1 dBz ET 的绝对偏差	1.94	0.67	1.47	2.69	1.71
FY-2C CTOP 与 -10 dBz ET 的绝对偏差	2.35	0.81	1.73	3.23	2.14

当组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时 SA 型号雷达 18 dBz 和 1 dBz 以及-10 dBz 回波顶高的散点分布。图 2a 中卫星反演云顶高与 18 dBz 回波顶高的相关系数为 0.47,红线和蓝线分别为采用最小二乘法拟合的反演云顶高与 18 dBz 回波顶高、过原点和不过原点的关系式:

$$18 \text{ dBz ET} = 0.728 \times \text{FY-2C CTOP};$$

$$18 \text{ dBz ET} = 0.587 \times \text{FY-2C CTOP} + 1.151;$$

卫星反演云顶高与 1 dBz 回波顶高的相关系数为 0.50,拟合的卫星云顶高与 1 dBz 回波顶高之间过原点(图 2b 中红线)和不过原点(图 2b 中蓝线)的回归式分别:

$$1 \text{ dBz ET} = 1.068 \times \text{FY-2C CTOP};$$

$$1 \text{ dBz ET} = 0.612 \times \text{FY-2C CTOP} + 3.73;$$

卫星反演云顶高与-10 dBz 回波顶高的相关系数为 0.38,拟合的卫星云顶高与-10 dBz 回波顶高之间过原点(图 2c 中红线)和不过原点(图 2c 中蓝线)的回归式分别:

$$-10 \text{ dBz ET} = 1.161 \times \text{FY-2C CTOP};$$

$$-10 \text{ dBz ET} = 0.463 \times \text{FY-2C CTOP} + 5.705.$$

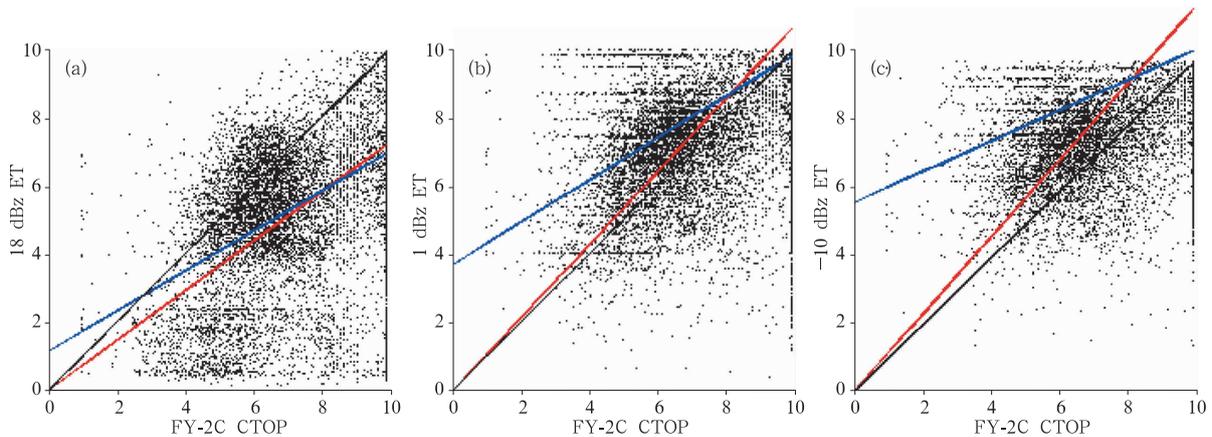


图 2 卫星反演云顶高度与当组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时 SA 型号雷达 18 dBz(a)和 1 dBz(b)以及-10 dBz(c)回波顶高的散点分布图

Fig. 2 Scatter plots of satellite-derived cloud-top-height and SA-radar echo-top of 18 dBz, 1 dBz and -10 dBz reflectivity when composite reflectivity  $\geq 30$  dBz

表 2 已列出了卫星反演云顶高与回波顶高的绝对偏差的一些统计量,为进一步分析其偏差的分布情况,将卫星云顶高与回波顶高的差值分为 14 档,每档间隔取为 1 km,可作出如图 3a、图 3b、图 3c 所示的卫星云顶高与当组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时 SA 型雷达回波顶高的差值频率分布直方图。从图 3a、图 3b、图 3c 能直观看出,图 3b 和图 3c 的分布较

相似,相比之下图 3a 分布最不对称,其分布明显偏向正值端。卫星云顶高与 1 dBz 回波顶高的差值频率分布图(图 3b)上,其差值小于 0 km 的占到 65.4%,第 1、2 和 3 峰值在-2~1 km 档内,其差值落在  $\pm 3$  km 的样本数占总数目的比重高达 79.2%(9109 个样本),差值在  $\pm 2$  km 以内占的比例约 62.9%(7231 个样本),差值在  $\pm 1$  km 之内的为

35.9%(4127 个样本)。卫星云顶高与  $-10$  dBz 回波顶高的差值频率直方图(图 3c)上,其差值小于  $0$  km 的数目占总的 75.0%,其分布较图 3b 更偏向负值端,其差值落在  $\pm 3$  km、 $\pm 2$  km 和  $\pm 1$  km 之内的数目分别占总的 72.6%、56.0%和 30.2%,均低于图 3b 中的数值,表明卫星云顶高与  $-10$  dBz 的差值分布较卫星云顶高与  $1$  dBz 的差值分布发散些。卫星云顶高与  $18$  dBz 回波顶高的差值频率分布图

(图 3a)上,其差值大于  $0$  km 的样本数高达总数的 79.0%,其差值在  $\pm 3$  km、 $\pm 2$  km 和  $\pm 1$  km 之内的样本数分别占总数的 71.0%、54.6%和 30.8%,且主要为差值为正值时的贡献。卫星云顶高与回波顶高的差值的频率分布所反映的两者间关系与表 2 相吻合,都表明当组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时,卫星云顶高比  $18$  dBz 回波顶高偏高的情况出现的概率大,卫星云顶高与  $1$  dBz 回波顶高最接近。

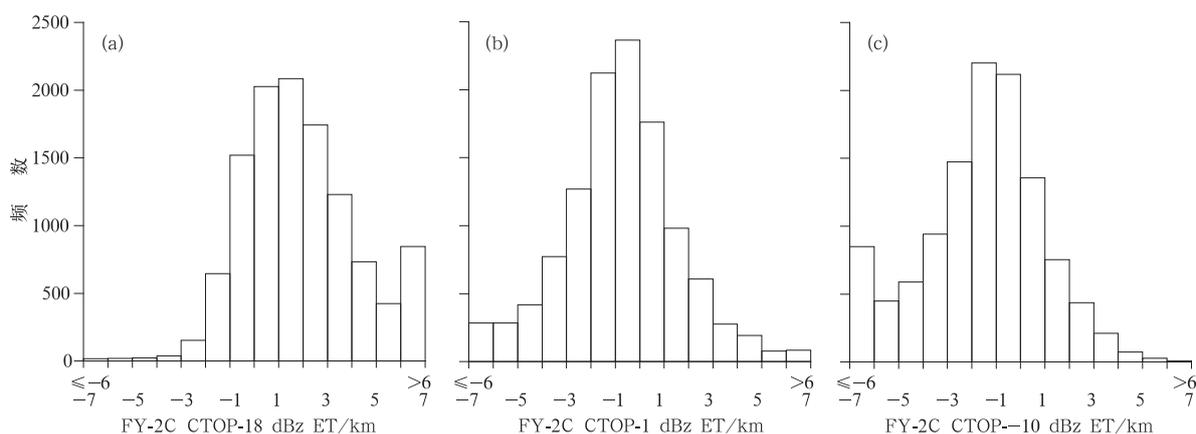


图 3 卫星反演云顶高分别与当组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时 SA 型雷达  $18$  dBz 回波顶高 (a) 和  $1$  dBz 回波顶高 (b) 以及  $-10$  dBz 回波顶高 (c) 的差值频率分布直方图

Fig. 3 Histograms of difference frequency distribution of satellite-derived cloud-top-height and SA-radar echo-top of  $18$  dBz (a),  $1$  dBz (b) and  $-10$  dBz (c) reflectivity when composite reflectivity  $\geq 30$  dBz

## 2.2 卫星反演云顶高与当组合反射率因子 $< 30$ dBz 时 SA 型号雷达回波顶高的关系

表 3 给出了对表 1 中个例反演的云顶高度(用 FY-2C CTOP 表示)与当组合反射率因子  $< 30$  dBz 时  $18$  dBz 回波顶高(用  $18$  dBz ET 表示)和  $1$  dBz 回波顶高(用  $1$  dBz ET 表示)以及  $-10$  dBz 回波顶高(用  $-10$  dBz ET 表示)总共 12659 个样本数算得的一些统计量。同当组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时一样,当组合反射率因子  $< 30$  dBz 时卫星反演云顶高总体上也表现出较  $18$  dBz 回波顶高偏大的趋势。

比较卫星反演云顶高与  $18$  dBz、 $1$  dBz 和  $-10$  dBz 回波顶高的绝对偏差的算术平均值和分位数可知,卫星云顶高与  $1$  dBz 回波顶高相对最接近。对比表 3 和表 2 发现,当组合反射率因子  $< 30$  dBz 时卫星云顶高和 3 个反射率因子阈值对应的雷达回波顶高的数值都比当组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时要偏小,当组合反射率因子  $< 30$  dBz 时卫星云顶高与  $1$  dBz 回波顶高( $-10$  dBz 回波顶高)的绝对偏差也比当组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时偏小,而当组合反射率因子  $< 30$  dBz 时卫星云顶高与  $18$  dBz 回波顶高的绝对偏差比当组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时偏大。

表 3 卫星反演云顶高与当组合反射率因子  $< 30$  dBz 时 SA 型雷达回波顶高的对比统计(单位: km)

Table 3 Comparison of statistics between satellite-derived cloud-top-height and SA-radar echo-top when composite reflectivity  $< 30$  dBz (units: km)

	算术平均值	25%分位数	中位数	75%分位数	标准差
FY-2C CTOP	6.70	5.25	6.40	8.40	2.16
$18$ dBz ET	3.94	1.89	4.25	5.37	2.31
$1$ dBz ET	6.29	4.67	6.11	7.65	2.59
$-10$ dBz ET	7.08	5.33	6.77	8.38	2.73
FY-2C CTOP 与 $18$ dBz ET 的绝对偏差	2.95	1.20	2.56	4.21	2.18
FY-2C CTOP 与 $1$ dBz ET 的绝对偏差	1.71	0.56	1.24	2.33	1.65
FY-2C CTOP 与 $-10$ dBz ET 的绝对偏差	1.85	0.59	1.28	2.37	1.93

图 4a、图 4b、图 4c 分别为卫星反演云顶高与当组合反射率因子  $<30$  dBz 时 SA 型号雷达 18 dBz 和 1 dBz 以及  $-10$  dBz 回波顶高的散点分布图。图 4a 中卫星云顶高与 18 dBz 回波顶高的相关系数为 0.42, 低于图 2a 的 0.47, 红线和蓝线分别为采用最小二乘法拟合的反演云顶高与 18 dBz 回波顶高、过原点和不过原点的关系式:

$$18 \text{ dBz ET} = 0.574 \times \text{FY-2C CTOP};$$

$$18 \text{ dBz ET} = 0.446 \times \text{FY-2C CTOP} + 0.946;$$

卫星云顶高与 1 dBz 回波顶高的相关系数为 0.53, 高于图 2b 的 0.50, 拟合的卫星云顶高与 1

dBz 回波顶高之间过原点(图 4b 中红线)和不过原点(图 4b 中蓝线)的回归式分别:

$$1 \text{ dBz ET} = 0.910 \times \text{FY-2C CTOP};$$

$$1 \text{ dBz ET} = 0.632 \times \text{FY-2C CTOP} + 2.053;$$

卫星云顶高与  $-10$  dBz 回波顶高的相关系数为 0.43, 高于图 2c 中的 0.38。拟合的卫星云顶高与  $-10$  dBz 回波顶高之间过原点(图 4c 中红线)和不过原点(图 4c 中蓝线)的回归式分别:

$$-10 \text{ dBz ET} = 1.008 \times \text{FY-2C CTOP};$$

$$-10 \text{ dBz ET} = 0.548 \times \text{FY-2C CTOP} + 3.402.$$

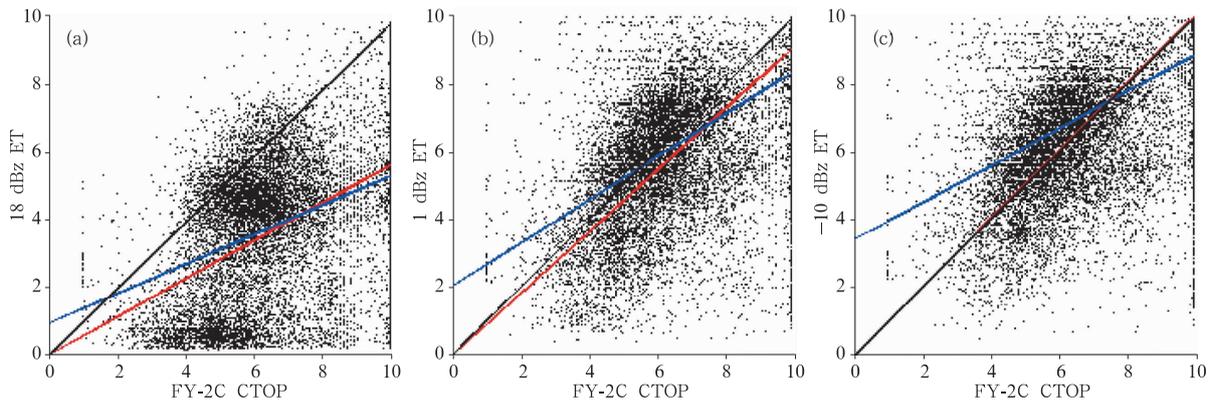


图 4 卫星反演云顶高度与当组合反射率因子  $<30$  dBz 时 SA 型号雷达 18 dBz (a) 和 1 dBz (b) 以及  $-10$  dBz (c) 回波顶高的散点分布图

Fig. 4 Scatter plots of satellite-derived cloud-top-height and SA-radar echo-top of 18 dBz (a), 1 dBz (b) and  $-10$  dBz (c) reflectivity when composite reflectivity  $<30$  dBz

卫星云顶高与当组合反射率因子  $<30$  dBz 时雷达回波顶高的差值频率分布见图 5a、图 5b、图 5c。直观可见图 5a 的分布较图 5b 和图 5c 不对称, 明显

偏向正值端, 图 5b 和图 5c 的差异不明显。卫星云顶高与 1 dBz 回波顶高的差值频率分布图(图 5b)上, 其差值大于 0 km 的数目占到 56.1%, 第 1、2 和

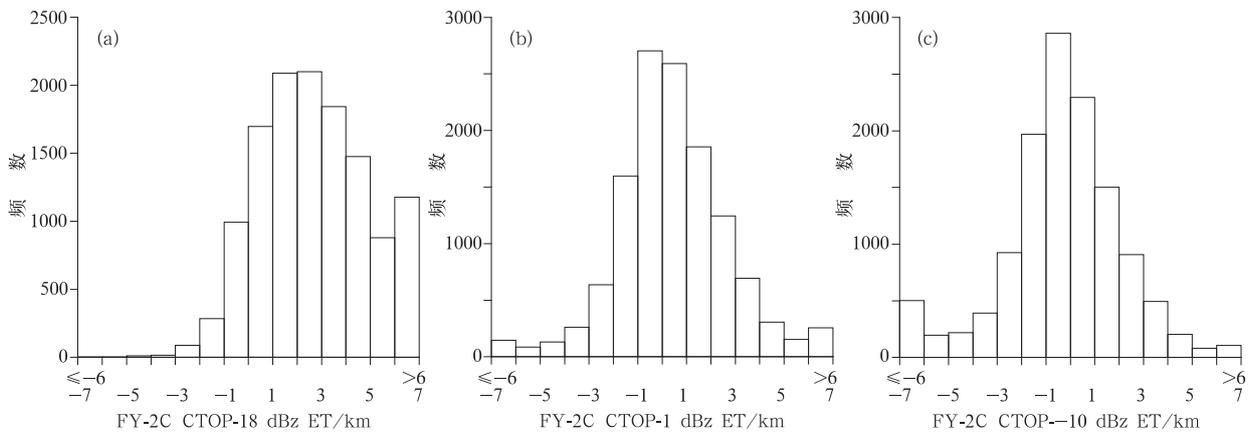


图 5 卫星反演云顶高分别与当组合反射率因子  $<30$  dBz 时 SA 型号雷达

18 dBz 回波顶高(a)和 1 dBz 回波顶高(b)以及  $-10$  dBz 回波顶高(c)的差值的频率分布直方图

Fig. 5 Histograms of difference frequency distribution of satellite-derived cloud-top-height and SA-radar echo-top of 18 dBz (a), 1 dBz (b) and  $-10$  dBz (c) when composite reflectivity  $<30$  dBz

3 峰值分布在  $-1 \sim 2$  km 档之间, 其差值落在  $\pm 3$  km、 $\pm 2$  km 和  $\pm 1$  km 的样本数分别占总数的 84.0% (10628 个样本数)、69.1% (8748 个样本数) 和 41.8% (5294 个样本数), 其大小都明显比图 3b 的偏大, 反映出与当组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时相比, 当组合反射率因子  $< 30$  dBz 时卫星云顶高与 1 dBz 回波顶高的差值分布更集中。卫星云顶高与  $-10$  dBz 回波顶高的差值频率分布图 (图 5c) 上, 其差值小于 0 km 的样本数达 55.8%, 造成图 5c 的分布相对较图 3c 对称, 其差值在  $\pm 3$  km、 $\pm 2$  km 和  $\pm 1$  km 之内的样本数分别占总数的 82.7%、68.2% 和 40.7%, 都比图 3c 的数值大, 再加上表 3 中卫星云顶高与  $-10$  dBz 回波顶高的绝对偏差比表 2 中的小, 因而与组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时相比, 当组合反射率因子  $< 30$  dBz 时卫星云顶高与  $-10$  dBz 回波顶高更接近。卫星云顶高与 18 dBz 回波顶高的差值频率直方图 (图 5a) 上, 其差值大于 0 km 的样本数高达 89.0%, 明显高于图 3a 中的 79.0%, 可见图 5a 的分布比图 3a 更偏向正值端, 其差值在  $\pm 3$  km、 $\pm 2$  km 和  $\pm 1$  km 之内的样本数分别占总数的 57.3%、40.0% 和 21.3%, 明显低于图 3a, 再加上

表 3 中卫星云顶高与 18 dBz 回波顶高的绝对偏差比表 2 中的大, 表明当组合反射率因子  $< 30$  dBz 时卫星云顶高与 18 dBz 回波顶高的差距相对于组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时要偏大。

综上所述, 如果将比较卫星反演云顶高与雷达回波顶高的主要统计量提取列出 (见表 4), 能够较清楚地看到, FY-2C/D 卫星反演的云顶高度与回波顶高的关系对组合反射率因子的依赖不明显, 也可以说它们之间的关系对不同云型和雨强不敏感。如果以表 4 列出的绝对偏差、其差值在  $\pm 3$  km 以内的比重、差值峰值所在档和相关系数来综合衡量卫星云顶高与回波顶高, 则可得出: 首先当组合反射率因子  $< 30$  dBz 时, 卫星云顶高与 1 dBz 回波顶高最为接近; 其次为当组合反射率因子  $< 30$  dBz 时卫星云顶高与  $-10$  dBz 回波顶高和当组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时卫星云顶高与 1 dBz 回波顶高; 然后是当组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 时卫星云顶高与  $-10$  dBz 回波顶高和卫星云顶高与 18 dBz 回波顶高; 最后当组合反射率因子  $< 30$  dBz 时, 卫星云顶高与 18 dBz 回波顶高的差异最大。

表 4 不同组合下卫星反演云顶高与雷达回波顶高对比的主要统计量一览

Table 4 Comparison of main statistics between satellite-derived cloud-top-height and radar-echo-top

	绝对偏差		差值在 $\pm 3$ km、 $\pm 2$ km 和 $\pm 1$ km 之内所占比重/%	差值频率分布 第 1、2 和 3 峰值 出现的档/km	相关系数
	算术平均值/km	中值/km			
当 CR $< 30$ dBz 时, FY-2C CTOP 与 1 dBz ET	1.71	1.24	84.0, 69.1, 41.8	第 $-1 \sim 2$	0.53
当 CR $< 30$ dBz 时, FY-2C CTOP 与 $-10$ dBz ET	1.85	1.28	82.7, 68.2, 40.7	第 $-2 \sim 1$	0.43
当 CR $\geq 30$ dBz 时, FY-2C CTOP 与 1 dBz ET	1.94	1.47	79.2, 62.9, 35.9	第 $-2 \sim 1$	0.50
当 CR $\geq 30$ dBz 时, FY-2C CTOP 与 $-10$ dBz ET	2.35	1.73	72.6, 56.0, 30.2	第 $-3 \sim 0$	0.38
当 CR $\geq 30$ dBz 时, FY-2C CTOP 与 18 dBz ET	2.38	1.76	71.0, 54.6, 30.8	第 $0 \sim 3$	0.47
当 CR $< 30$ dBz 时, FY-2C CTOP 与 18 dBz ET	2.95	2.56	57.3, 40.0, 21.3	第 $1 \sim 4$	0.42

### 3 结论和讨论

通过对表 1 所列个例主要用 FY-2C/D 卫星反演的云顶高度与雷达回波顶高的较详细对比分析, 当以 30 dBz 组合反射率因子为阈值对以积层混合云和层状云为主的降水云类型作区分时, 对于卫星反演云顶高与反射率因子为 18 dBz、1 dBz 和  $-10$  dBz 对应的回波顶高之间的关系有如下初步认识。

卫星反演的云顶高与雷达回波顶高的关系跟降水云的类型和雨强的大小的联系不大。无论对于组合反射率因子  $\geq 30$  dBz 还是  $< 30$  dBz, 与 18 dBz 回

波顶高相比, 卫星云顶高与 1 dBz ( $-10$  dBz) 回波顶高的绝对偏差的平均值和中值都偏小, 其中卫星云顶高与 1 dBz 回波顶高的绝对偏差的平均值为 1.71  $\sim$  1.94 km, 而卫星云顶高与 18 dBz 回波顶高的绝对偏差的平均值为 2.38  $\sim$  2.95 km。与 18 dBz 回波顶高相比, 卫星云顶高与 1 dBz ( $-10$  dBz) 回波顶高的差值的频率分布较为对称, 其第 1、2 和 3 的峰值位于第  $-3 \sim 2$  km 档内, 其中卫星云顶高与 1 dBz 回波顶高的差值在  $\pm 3$  km 以内的样本数占总数的比重超过 79%, 其差值在  $\pm 2$  km 以内的高于 62%, 而卫星云顶高与 18 dBz 回波顶高的差值在  $\pm 3$  km 以内的样本数占总数的比例不超过 71%, 在  $\pm 2$  km

以内的不到 55%。卫星反演云顶高与 1 dBz 回波顶高的相关性(相关系数为 0.50~0.53)强于卫星反演云顶高与 18 dBz 回波顶高的相关性(相关系数为 0.42~0.47)。因此,卫星云顶高与<18 dBz 反射率因子对应的回波顶高比与 18 dBz 回波顶高更加接近。

卫星云顶高与<18 dBz 雷达回波顶高的关系比与 18 dBz 回波顶高的关系更为密切,这主要是由卫星和雷达的探测和反演的原理不同造成。由于 FY-2C/D 卫星不像微波辐射计和云雷达那样能够穿透云,用红外和水汽通道探测的辐射量通过辐射传输模式得到的拟合算式反演的云顶高度对于粒子尺度不敏感,对于积层混合云和层状云反映的主要是云顶部云粒子的信息。S 波段雷达探测的主要是雷达发出的电磁波投射到较大降水粒子上的向后散射波,对主要位于积层混合云和层状云的中下部的较大降水粒子敏感,因而当采用 18 dBz 反射率因子作为求取回波顶高的阈值时,得到的回波顶高明显比卫星云顶高偏低。当采用<18 dBz(如 1 dBz 和 -10 dBz)为回波顶高阈值时,云中较小的粒子也会对回波起一定作用,因而回波顶高同卫星云顶高更接近。至于卫星反演云顶高是否与<1 dBz(如 -10 dBz)回波顶高的相关关系比与 1 dBz 回波顶高的更好,仍有待继续探讨。

对主要用 FY-2C/D 卫星并融合其他观测资料反演的云顶高度与地基 S 波段多普勒天气雷达回波顶高之间关系的初步探讨表明两者之间确实存在一定的对应关系。为了真正有效地将卫星反演的云产品用于监测短时临近天气和指导人影作业,需要继

续在卫星云产品与由其他仪器探测反演的同类产品的对比检验、反演算法的改进和产品的解释应用等方面开展大量深入细致的工作。

## 参考文献

- [1] 周毓荃,陈英英,李娟,等. 用 FY-2C/D 卫星等综合观测资料反演云物理特性产品及检验[J]. 气象,2008,34(12):27-35.
- [2] 李娟,毛节泰,姚展予,等. GMS-5 卫星资料反演云的物理特性及其在人工影响天气中的应用[J]. 气象学报,2005,63(增刊):47-55.
- [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] 陈英英,唐仁茂,周毓荃,等. FY-2C/D 卫星微物理特性参数产品在地面降水分析中的应用[J]. 气象,2009,35(2):15-18.
- [5] 唐仁茂,向玉春,叶建元,等. 多种探测资料在人工增雨作业效果物理检验中的应用[J]. 气象,2009,35(8):70-75.
- [6] Hawkinson J A, Feltz W and Ackerman S A. A comparison of GOES sounder- and cloud lidar- and radar-retrieved cloud-top heights[J]. J Appl Meteor, 2005, 44: 1234-1242.
- [7] Mace G G, Zhang Y, Platnick S, et al. Evaluation of cirrus cloud properties derived from MODIS data using cloud properties derived from ground-based observations collected at the ARM SGP site[J]. J Appl Meteor, 2005, 44: 221-240.
- [8] 程周杰,王洪芳,白洁. 云微物理参数的地基探测反演研究综述[J]. 气象科技,2007,35(1):9-14.
- [9] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006:4, 185.
- [10] 王红艳,刘黎平,肖艳娇,等. 新一代天气雷达三维数字组网软件系统设计与实现[J]. 气象,2009,35(6):13-18.
- [11] 张培昌,戴铁丕,杜秉玉,等. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,1992:91-92.