

刘健, 蒋建莹. 2013. FY-2C 高时间分辨率扫描数据在强对流云团监测中的应用研究 [J]. 大气科学, 37 (4): 873–880, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12062. Liu Jian, Jiang Jianying. 2013. Using FY-2C high temporal resolution regional scan data to monitor strong convective cloud [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (4): 873–880.

FY-2C 高时间分辨率扫描数据在强对流云团监测中的应用研究

刘健 蒋建莹

国家卫星气象中心, 北京 100081

摘 要 利用我国首次获取的静止气象卫星平均 10 分钟观测间隔的高时间分辨率数据对 2011 年 6 月 28 日~29 日发生的一次强对流云团特征进行分析。Hovmöller 分析图清晰地展示出在高时间分辨率观测条件下云团中心冷核的演变特征。高时间分辨率卫星资料与地面降水量进行联合分析, 可推知对流云团中冷核的演变与地面小时降水量大值的落区间有很好的一致性; 10 分钟雨量资料联合前推 1 小时内 7 次平均 10 分钟观测间隔的卫星红外 1 通道亮温, 分析可知地面雨量较大时, 云顶像元亮温具有持续降低或维持低温状态的特点。反映出在对流性强降水云中, 冷且具有一定稳定性的云顶是产生大降水的主要特征。研究结果显示, 静止气象卫星的高时间分辨率观测可很好地捕捉到强对流云团发展的演变特征, 利用 FY-2C 静止气象卫星红外 1 通道亮温、红外 1 通道与水汽通道亮温差在高时间分辨率观测中的时差特征变量, 可实现对强对流云团初生的有效监测, 为强对流云团的预测预报提供支撑。

关键词 FY-2 快速区域扫描 强对流云团 监测

文章编号 1006-9895(2013)04-0873-08

中图分类号 P405

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12062

Using FY-2C High Temporal Resolution Regional Scan Data to Monitor Strong Convective Cloud

LIU Jian and JIANG Jianying

National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract The FY-2C geostationary satellite performed its first rapid regional scan test in 2011, yielding high temporal resolution data. The mean observation frequency is about 10 min. Observational test data were used to analyze a strong convective cloud development process that appeared on June 28–29, 2011, in Guangdong Province. The results show that the parameter difference between high-frequency observations can be used to monitor the initial development of convective clouds. The parameters can be selected as the brightness temperature at the infrared window channel and the brightness temperature difference between the infrared window channel and water vapor channel. At the initial phase of convective cloud formation, the cloud top first appeared strong cooling at the infrared window channel. Then, the brightness temperature difference between the infrared window and water vapor channels decreased, demonstrating that the height of the cloud top developed considerably. Accompanied by the development of convective clouds, the minimum brightness temperature continued to decrease, and the number of cold cloud pixels increased gradually, indicating that the cloud continued to develop. Hourly precipitation data at the surface are classified into three levels: smaller than 5 mm,

收稿日期 2012-04-09, 2012-11-16 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41175022, 国家科技支撑计划 2012BAC22B05, 科技部公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201206003

作者简介 刘健, 女, 1969 年出生, 博士研究生, 研究员, 主要研究方向为大气参数遥感反演方法及应用。E-mail: liujian@cma.gov.cn

between 5 mm and 10 mm, and larger than 10 mm. According to the different precipitation levels, the statistical distribution of the brightness temperature in the infrared window channel was analyzed. The results show that the cold cloud top is the main property producing strong precipitation during a strong convective cloud process. The colder the cloud top is, the stronger the precipitation is that appears on the surface. A Hovmöller diagram is used to show the evolving properties of the cloud cold core in high-frequency observation mode. Combined with hourly precipitation data, it can show good agreement between the location of the cold cloud core and the center of maximum precipitation. Because there are six observations during 1 h during the high-frequency rapid regional scan, the standard deviation in the brightness temperature is calculated. A smaller standard deviation in the brightness temperature during 1 h indicates fewer changes in the cloud top properties. When heavy precipitation appears on the surface, the cloud not only has a colder top temperature, but also the colder cloud top should remain for a certain time period. On the basis of the above analysis, a high-frequency rapid regional scan can capture the features of evolving convective cloud properties, providing technological support to forecast the initial stages of a convective cloud mass.

Keywords FY-2 rapid regional scan, Strong convective cloud, Monitoring

1 引言

卫星云图作为一种监测对流天气的有效工具,不仅在常规资料缺乏的地区具有得天独厚的优势,而且在常规资料丰富的地区也具有不可替代的作用。它不仅可以准确地判定强对流云团的范围大小、强度和发展变化趋势,还可以连续不断地监视云团的发展变化,其资料的观测时间频次和准确度大大超过了常规资料。随着天基观测对大气系统在时间和空间观测分辨率上的提高,使得卫星资料对天气,尤其是短期天气的观测和预报能力得到不断提高。

在对流云识别和云顶特性监测分析中,多数研究利用 1 小时时间分辨率的数据,获得了较为满意的对流云顶性质的分析监测方法,发展了较好的对流云识别算法(白洁等, 1997; 王登炎等, 1998; 朱亚平等, 2009; 江吉喜和范梅珠, 2002; Adler and Fenn, 1979; Ackerman, 1996; Schmetz et al., 1997; Riehl and Schleusener, 1962; McCann, 1983; Hill, 1991; Setvak and Doswell, 1991; Strabala et al., 1994; Minnis and Young, 2000; 方兆宝等, 2004; Berendes et al., 2008)。但 1 小时观测频次的卫星数据无法满足对流初生预报的需求。

随着天气预报技术的发展,对预报准确性的要求越来越高,对对流初生预报的需求也越来越迫切。Mecikalski and Bedka (2006) 利用连续时间分辨率为 5~15 分钟的 GOES 1km 分辨率可见光通道和 4~8 km 分辨率红外通道数据进行初生对流监测方法研究。他的研究表明,通过多通道组合形成的指标不仅可以很好地监测到对流云的发生,而且可提前 30~45 分钟预报对流的发生,这一研究成

果为对流预报提供了良好的基础。但由于很长时间以来无法获取覆盖我国区域的高时间分辨率卫星观测数据,使得国内利用高时间分辨率卫星数据预报对流初生的研究工作无法全面开展。

我国自主研制的风云二号静止气象卫星(简称 FY-2)可实现对全球的连续观测,但强对流是发展迅速的天气过程,常规单星 60 分钟观测、汛期 30 分钟间隔的卫星数据很难满足对强对流发展演变过程的监测需求。尽管 FY-2 双星观测在汛期可获得平均 15 分钟的观测数据,但由于涉及两颗卫星,观测角度不同,使得观测数据需要进行进一步的处理后才可使用。因此提高单星的观测时间频率,获取高时间分辨率的观测数据,是实现预报、监测对流初生和对流发展演变的基础。国家卫星气象中心利用退役的风云二号 C 卫星(简称 FY-2C)开展了区域高时间分辨率扫描观测试验,获取了平均 10 分钟间隔的连续观测数据,为强对流的及时监测提供了数据基础。

本文利用 FY-2C 区域观测模式下获取的高时间分辨率观测数据,对 2011 年 6 月 28 日~29 日的一次强对流天气过程进行分析,揭示高时间分辨率静止气象卫星观测数据在对流云发展演变过程中的作用以及强对流云发展过程中的云系特征,为对流云的识别、追踪和预报奠定基础。

2 数据和方法

至今为止, FY-2 共发射了 6 颗卫星,其中 FY-2A 和 FY-2B 是试验卫星, FY-2C、FY-2D、FY-2E 和 FY-2F 是业务卫星,其中 FY-2C 已退役, FY-2D 和 FY-2E 是业务运行卫星, FY-2F 是业务备份星。四颗业务卫星上均搭载有包括可见光(0.5~0.9 μm)、

中波红外 ($3.5\sim 4.0\ \mu\text{m}$)、热红外 (红外 1 通道 ($10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$), 红外 2 通道 ($11.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$)) 及水汽 ($6.3\sim 7.6\ \mu\text{m}$) 探测通道。可见光通道具有 1.25 km 和 5 km 两种空间分辨率数据, 红外通道的空间分辨率均为 5 km。本研究中采用的卫星数据是 FY-2C 数据。

与全圆盘扫描数据相比, FY-2C 卫星区域扫描数据保留了全部的探测通道信息, 但区域扫描数据的时间分辨率较高, 平均 10 分钟可获取一次观测数据。区域扫描数据的观测区域较小, 本研究中 FY-2C 卫星数据的空间覆盖范围是 $10^\circ\sim 40^\circ\text{N}$, $80^\circ\sim 160^\circ\text{E}$ 。

为了更好地描述云系在一定时序内的变化特征, 引入 Hovmöller 分析图 (Hovmöller, 1949)。Hovmöller 分析图是气象上用于描述波运动的常用方法, 主要用于分析参数的时间演变特征。Hovmöller 图的横坐标一般是经度或纬度, 纵坐标是时间, 分析数据可用不同的颜色或阴影代表。

3 云团的物理特征演变分析与对流云团识别

3.1 云团的物理特征分析

图 1 是 2011 年 6 月 28 日 11:12~12:01 (世界

时, 本文时间除特殊说明外均为协调世界时) 6 个观测时次平均 10 分钟扫描频率的 FY-2C 区域扫描红外 1 通道亮温等级图像。以图像中的红色框数据为例, 展示 10 分钟观测模式下, 云团亮温的变化。在 11:12 和 11:21 两个时次云团在红外 1 通道上的亮温均是 230.35 K, 11:30 云团的红外 1 通道亮温为 227.45 K, 9 分钟内云团亮温下降了约 3 K。11:43 云团亮温为 213.99 K, 与 11:30 相比, 云团亮温在 13 分钟内降低了 13 K; 与 11:12 的观测相比, 云团顶部亮温在 30 分钟内降低了 17 K。11:52 云团顶部亮温为 210.02 K, 12:01 为 208.62 K, 且云团中亮温低于 230 K 的云像元数从 11:43 的 11 个像元扩大到 11:52 的 18 个像元, 再到 12:01 的 41 个像元, 反映出所分析区域中云顶部像元最低亮温的持续降低和低温云像元数的不断扩大。10 分钟频次的观测数据与 30 分钟频次的观测数据相比较, 易于捕捉云团亮温发生明显变化的时间点, 如云团亮温的第一次较明显的变化介于 11:21~11:30 之间, 较为强烈的降温发生在 11:30~11:43 之间, 13 分钟内 13 K 的降温幅度提示有对流初生的可能性。

选取 $21^\circ\sim 23^\circ\text{N}$ 范围内云团的最低红外 1 通道亮温作为分析参数, 制作 2011 年 6 月 28 日 00:01~6 月 29 日 23:52 平均观测间隔 10 分钟的红外 1 通

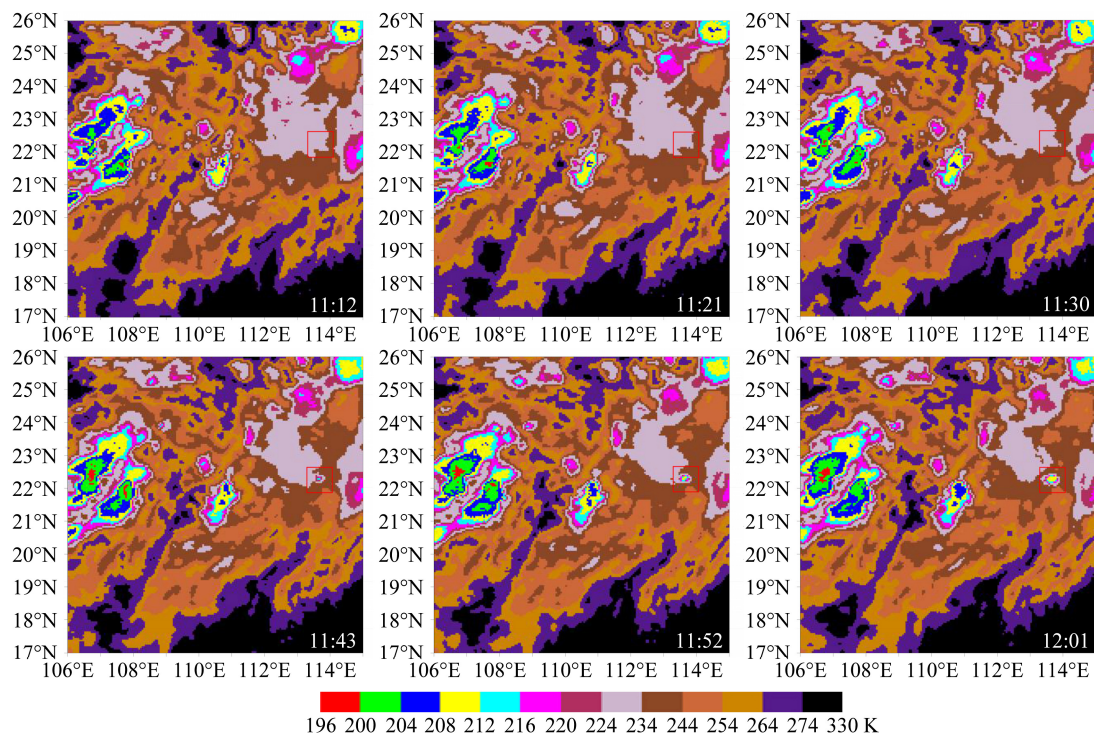


图 1 2011 年 6 月 28 日 11:12~12:01 时段 6 个时次 FY-2C 红外 1 通道亮温等级图像

Fig. 1 Brightness temperature image at FY-2C infrared channel 1 during 1112~1201 UTC on June 28, 2011

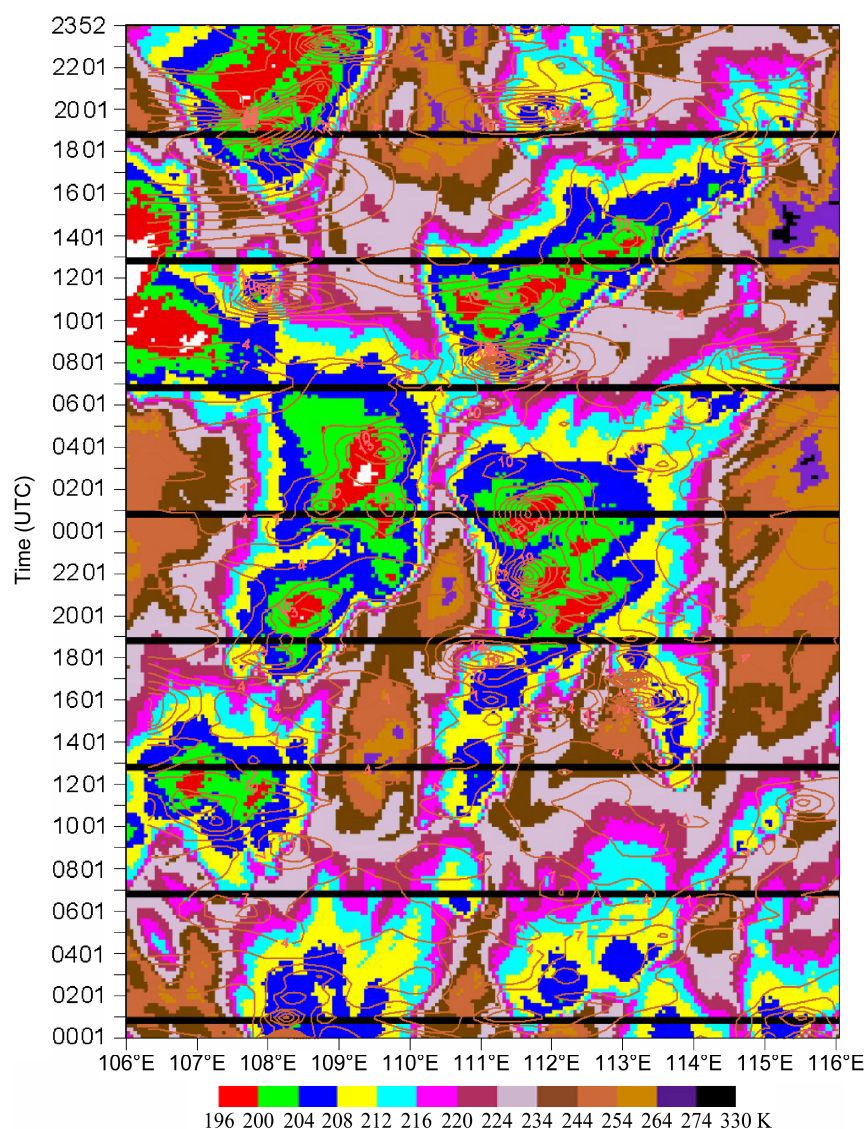


图2 2011年6月28日00:01~6月29日23:52平均10分钟观测间隔红外1通道亮温Hovmoller分析图。图上叠加小时降水量的Hovmöller分析图
Fig. 2 Hovmöller diagram of the minimum brightness temperature at infrared channel 1 that is overlaid with hourly precipitation contour from 0001 UTC 28 Jun to 2352 UTC 29 Jun, 2011

道亮温随经度和时间变化的 Hovmöller 图 (图 2)。图 2 中黑色条带是由于从 00:00 起, 每相隔 6 小时就会缺少 2 次平均 10 分钟间隔的观测引起。从图 2 中可以清晰地看到, 在 $106^{\circ}\sim 116^{\circ}\text{E}$ 经度范围内, 28 日 00 时至 29 日 23 时, 近 48 小时时间段内有多个对流云团活动, 在不同时间和空间范围内出现了 6 个云团顶部亮温低于 200 K 的对流云团 (图 2 中的红色)。

对比图 1, 以 114°E 附近对流云团为例分析平均 10 分钟观测数据在云团发展演变过程中的应用。在 28 日 07:00 之前, $112^{\circ}\sim 113^{\circ}\text{E}$ 经度内有冷云团活动, 云团的最低红外 1 通道亮温低于 208 K (图 2 中的蓝色)。07:00~12:00 时段, 云团整体向东移

动, 云团顶部像元红外 1 通道亮温逐渐升高至 234 K, 周边没有更冷的云团。接近 12:00, 在 114°E 附近云团顶部观测像元的红外 1 通道亮温逐渐降低, 云团中低温云像元个数较少, 云像元的最低亮温值高于 205 K。

13:00 之后像元的红外 1 通道亮温持续较低, 并具有向西的微弱移动。18:32, 尽管云团中低于 224 K 的云像元数目逐渐增多, 但云像元的最低亮温一直高于 205 K。19:01 之后对流云团面积出现跳跃式扩大, 云团中红外 1 通道亮温低于 255 K 的像元数从 18:32 的 575 个扩大到 19:03 的 1577 个, 并出现低于 200 K 的冷核, 云团的冷云顶介于 $112^{\circ}\sim 113^{\circ}\text{E}$ 之间。低于 204 K 的云团冷核维持了近 5 个

小时,直至 29 日 02 时。期间云团中心冷核位置稳定少变,仅有略向西移动的趋势。29 日 02 时开始至 07 时,云团顶部云像元红外 1 通道亮温值有所回升,但 29 日 08 时,云团的亮温再次降低,并转向东移动。15:00 起,云像元的亮温值再次逐渐回升,并继续向东移动,强对流云团逐渐消亡。基于上述分析可知,伴随对流云团的发展,对流云团顶部像元经历了亮温降低、低温像元数增多、面积扩大等几个阶段。

3.2 对流云团识别方法

图 3 是利用辐射传输模式 Streamer 模式模拟计算的 FY-2C 卫星红外 1 通道和水汽通道亮温差随云顶高度的变化。从图 3 中可见,在云顶高度高于 6 km,云顶的红外 1 通道亮温低于 273 K 时,随着云顶高度的抬升,云顶在红外 1 通道的亮温不断下降,同时与水汽通道间的亮温差值逐渐减小,反映出随云团的发展,云团顶部像元在红外 1 通道和水汽通道辐射特性的变化。

考虑到白天和夜间对流云检测方法的一致性,借鉴 Mecikalski et al. (2008) 的研究成果,利用云团在红外探测通道的辐射特性,采用窗区红外通道(红外 1 通道,简写 IR1)亮温、红外 1 通道亮温随时间的递减率、水汽通道(简写 WV)与红外 1 通道亮温差、中波红外通道与红外 1 通道亮温差等几个指标进行检测。检测表达式可写为:

$$T_{IR1} < 273 \text{ K}, \quad (1)$$

$$\Delta T_{10 \text{ min}} < a_{BT}, \quad (2)$$

$$\Delta T_{20 \text{ min}} < \Delta T_{10 \text{ min}}, \quad (3)$$

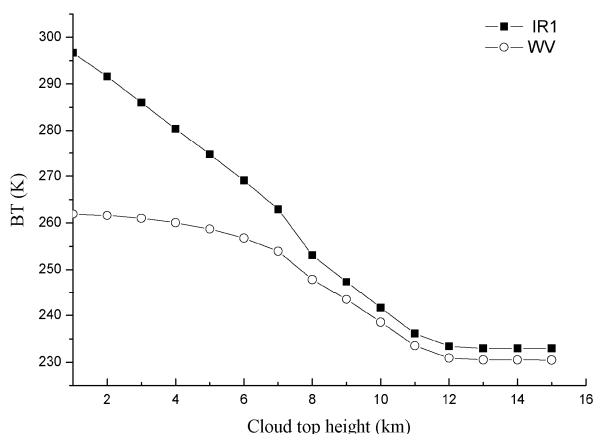


图 3 利用 Streamer 模式计算的 FY-2C 红外 1 通道和水汽通道亮温(BT)差随云顶高度的变化

Fig. 3 Calculated brightness temperature (BT) difference between infrared 1 channel and water vapor channel as the function of cloud top height by Streamer model

$$T_{D(WV-IR1)} < b, \quad (4)$$

$$\Delta T_{D(WV-IR1)10 \text{ min}} > c_{BTD2}, \quad (5)$$

其中, T_{IR1} 为红外 1 通道亮温, $\Delta T_{10 \text{ min}}$ 代表 10 分钟内红外 1 通道亮温的递减; a_{BT} 代表红外 1 通道亮温的阈值。式 (3) 表示为红外 1 通道亮温在 20 分钟内的降低值大于 10 分钟内的降低值; $T_{D(WV-IR1)}$ 为水汽通道和红外 1 通道的亮温差, 亮温差越大, 说明云顶发展越高; b 代表水汽和红外 1 通道亮温差的阈值。 $\Delta T_{D(WV-IR1)10 \text{ min}}$ 是 10 分钟内水汽通道和红外 1 通道的亮温差的减少量, 代表了云顶发展的程度大小; c_{BTD2} 是 10 分钟水汽通道和红外 1 通道亮温差阈值。在白天, 除红外通道亮温外, 还可辅助利用可见光通道的反射率信息对对流云团进行检测识别。

根据 (1) ~ (5) 式, 得到 2011 年 6 月 28 日 11:30、11:43 和 11:52 三个观测时次的对流云识别图像(图 4)。图中黑色为识别出的对流云团, 图中方框区域为图 1 中的红色分析区。对比图 1, 从图 4 可知分析区中的云团在 11:30 没有对流云出现, 11:43 出现了对流云, 随后 11:52 对流云进一步发展。

4 对流云团特征与地面降水量间的关系

4.1 与小时降水量间的关系

选取 2011 年 6 月 28 日 08 时到 6 月 29 日 08 时(北京时间)逐小时降水量及平均 10 分钟的卫星观测数据, 分析云团的变化与所选分析区中地面 1 小时观测降水量间的关系。由于地面观测站是点数据, 而卫星观测是面数据, 因此以地面雨量站为基准, 匹配卫星数据。小时雨量站的空间分布极少出现两个站点的经纬度距离均小于 0.05 度, 说明极少出现卫星观测的一个像元对应地面多个观测站点的情况, 一旦出现一个卫星观测像元对应多个地面观测点地情况, 将对地面观测的多个雨量做平均处理。为了便于分析, 将小时降水量分为 0.1~5 mm、5~10 mm 和大于 10 mm 三个等级。

图 5 是对应小时降水量三个等级的云团顶部亮温的分布直方图。从图 5 可以看出, 对于小时降水量小于 5 mm 的 4923 个样本, 云顶亮温值域较大, 分布在 200~280 K 之间。1 小时内云顶亮温的最小值分布的最大峰值中心亮温位于 217.5 K, 像元亮温高于 233~258 K 的温度区间内, 像元的分布较

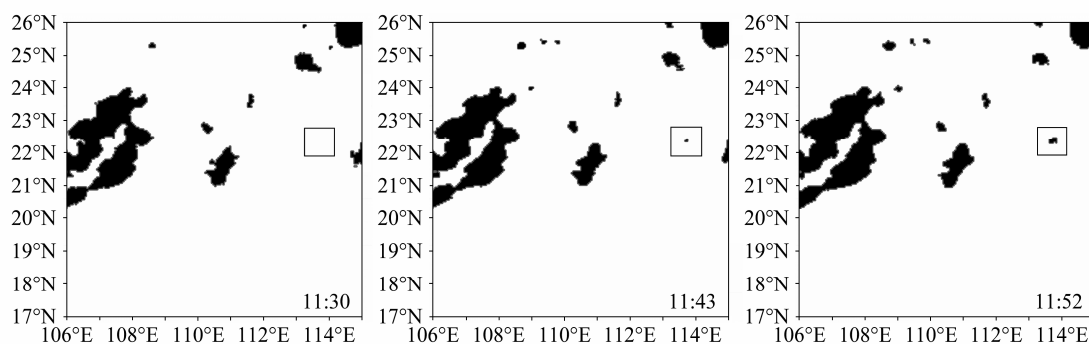


图4 2011年6月28日11:30、11:43和11:52三个观测时次对流云团识别图, 黑色为识别出的对流云团。图中方框为感兴趣区

Fig. 4 Convective cloud detection results at 1130, 1143, and 1152 UTC on June 28, 2011. Black box shows the interested area

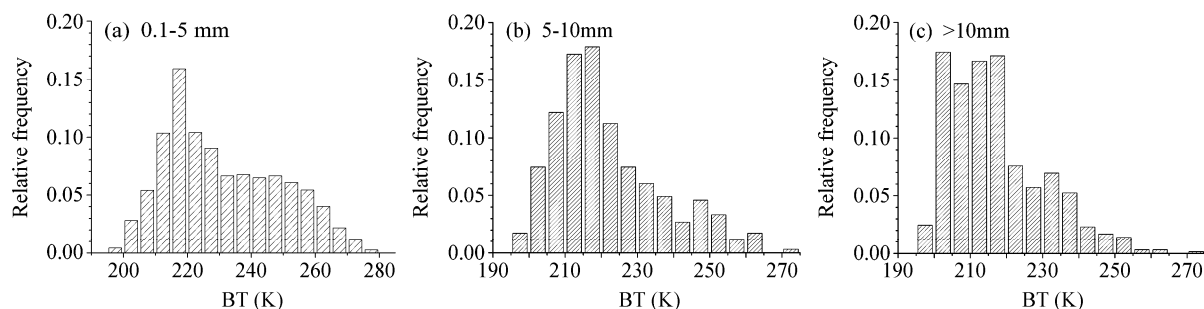


图5 对应小时降水量为(a) 0.1~5 mm、(b) 5~10 mm和(c) 大于10 mm三个等级的云团顶部平均红外1通道亮温分布

Fig. 5 The mean infrared channel 1 brightness temperature histogram for different hourly precipitation levels: (a) 0.1–5 mm; (b) 5–10 mm; (c) >10 mm

为均衡。亮温高于 265 K 后还有近 200 个像元样本, 反映出地面小时降水量较小时, 云顶特征冷云顶为主要特征, 其次还包含非常小的部分暖云顶。当小时降水量增加到 5~10 mm 时, 对 631 个样本的分析表明, 云顶亮温的分布呈现单一的冷云顶, 云顶亮温的分布峰值位于 212.5 K 附近, 有 38.7% 样本的云顶最低亮温低于 215 K, 86.2% 样本的云顶最低亮温低于 240 K。随着小时雨量的进一步增大 (>10 mm), 云顶亮温的峰值分布向低温端移动, 648 个样本中的 64.5% 像元的云顶最低亮温低于 215 K, 96.3% 像元的亮温低于 240 K。不同降水量等级的像元样本亮温分布显示: 地面降水量越大, 对应的云顶温度低的样本量越大。

选取 6 个站点, 分析站点小时降水量与云顶亮温的关系 (图 6)。从不同时段站点的降水量与云顶亮温的对应关系可见, 地面降水量与云顶亮温呈现明显的反相关关系: 云顶亮温高, 地面降水量小; 云顶亮温低, 地面降水量大。从图 2 的云团红外 1 通道最低亮温与小时降水量的 Hovmöller 分布叠加图中可清晰看出, 地面大降水中心与云团中冷核位置的分布存在相当好的匹配性。通过上述分析可推知, 在对流性降水中, 冷云顶是产生大降水的主要特征。

利用 1 小时内平均 6 次观测获取的云顶亮温, 计算 1 小时内云顶亮温的最小值、最高值和云顶亮温变化值, 分析 1 小时内云团云顶亮温的变化特征与小时雨量间的关系。对小时降水量划分等级后, 统计小时内观测的云顶亮温的变化 (如表 1 所示)。从表 1 可知, 随着小时降水量的增加, 云顶亮温在 1 小时内的变化幅度小 (最高值和最小值间的亮温差小) 的样本比例增加, 云顶亮温最高值与最小值间的差值小于 5 K 的样本比例从雨量小于 5 mm 的 39.3% 增长到雨量大于 10 mm 的 50.3%。云顶亮温标准方差小的样本比例增加, 云顶亮温方差小于 2 K 的样本比例从雨量小于 5 mm 的 40.9%, 增加到雨量大于 10 mm 的 52.6%。说明当云团发展, 地面产生大降水时, 云顶维持有相当数量的冷云像元。

4.2 与 10 分钟自动站降水量间的关系

利用地面观测的 10 分钟雨量资料对应前推 1 小时内 7 次观测的卫星数据, 分析云顶部像元亮温的变化与地面 10 分钟雨量间的关系, 从而推知不断变化的云对地面降水的影响。选择 17°~26°N, 106°~116°E 范围内 10 分钟雨量观测站, 以站点为基准, 匹配卫星数据, 匹配方法同小时雨量与卫星观测值间的匹配方法。图 7 选取雨量较大的 6 月

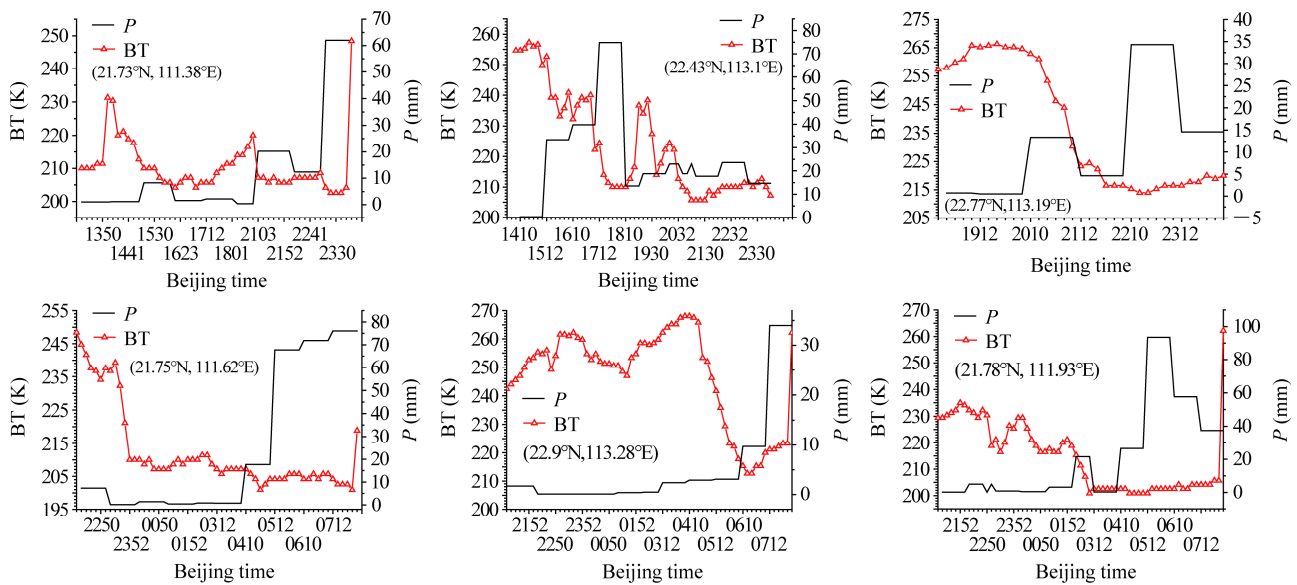


图 6 站点小时降水量（北京时）与云顶像元红外 1 通道亮温间的对应关系。
Fig. 6 The relationship between hourly precipitation and infrared channel 1 brightness temperature at cloud top at six stations

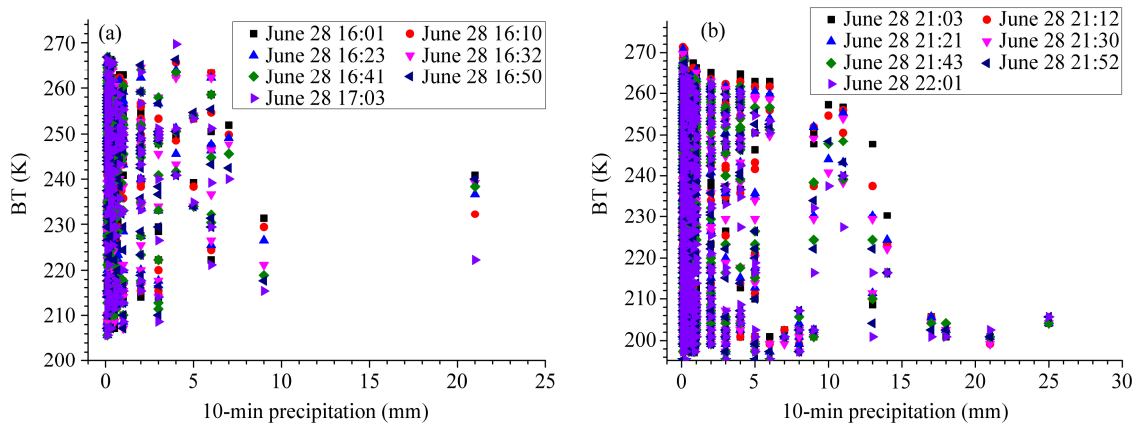


图 7 以 6 月 28 日 16:00 和 21:00 为例说明每正点后第 10 分钟观测的站点 10 分钟雨量与前一小时内平均间隔 10 分钟的 7 次 FY-2C 卫星观测红外 1 通道亮温的对应散点图
Fig. 7 The scatter diagram between the 10-minute precipitation in one hour and brightness temperature at infrared channel 1 of FY-2C one hour before

28 日 16 时（图 7a）和 21 时（图 7b）为例，绘制每正点后第 1 个 10 分钟观测的站点 10 分钟雨量与前一小时内平均间隔 10 分钟的 FY-2C 卫星观测红外 1 通道亮温的对应关系散点图，如图 7a 代表了 16:10 地面观测的 10 分钟雨量与 16:01、16:10、16:23、16:32、16:41、16:50 和 17:03 七个观测时次的 FY-2C 红外 1 通道亮温的对应关系图。从图 7 可知，地面出现小雨时，云顶亮温的值域分布较广，从 200 K 到 260 K 均有。当地面出现较大雨量时，以低温云顶特性为主，并伴随有云顶像元亮温的持续降低或云顶维持低温状态的特性。云顶像元红外 1 通道亮温与地面 10 分钟降水间关系的总体趋势是随着地面降水量的增大，云顶像元红外 1 通

道上的亮温降低。
表 1 小时降水量与云顶亮温间对应关系的样本百分比
Table 1 The sample percent of the statistic relationship between precipitation and brightness temperature at FY-2C infrared channel 1

小时降水量 等级	小时内云顶亮温最高值与 最小值间的差值/K			小时内云顶亮温 标准方差/K		
	0~5	5~10	10~15	0~2	2~4	4~6
0~5 mm	39.3%	30.5%	13.2%	40.9%	28.8%	13.5%
5~10 mm	48.1%	28.5%	10.6%	50.2%	27.1%	10.6%
>10 mm	50.3%	25.2%	8.6%	52.6%	23.1%	8.6%

5 小结

在我国首次进行的静止气象卫星的快速区域

扫描观测试验中, 获取到平均 10 分钟观测间隔的探测数据。选用高时间分辨率的扫描数据对一次强对流天气过程进行分析, 经过分析可知, 对于发展快速的强对流云团, 与传统的观测模式相比, 快速区域扫描的高时间分辨率观测模式可以更好地捕捉到云团发展变化的特征:

(1) 在对流云团的初生期, 云团顶部像元会出现较为强烈的降温, 红外通道与水汽通道亮温差会逐渐减小, 表征云顶在不断上升; 伴随云团的发展, 云团中低温端像元亮温不断降低, 云团中低温像元的个数不断增长, 表明云团不断发展。

(2) 将地面降水量分为不同等级, 针对不同降水等级, 统计分析云像元红外通道 1 亮温的分布, 统计结果表明, 在对流性降水中, 冷云顶是产生大降水的主要特征, 地面出现的降水量越大, 云顶亮温越低。利用 Hovmöller 分析图, 可清晰地展示云团中冷核的发展和移动状况。将云团中的冷核像元与地面小时降水量相叠合, 可知地面大降水区域与云团中冷核的位置有较好的匹配性。利用 1 小时内 6 次观测的云顶亮温, 计算小时内云顶亮温标准方差, 配合小时雨量, 可推知产生大降水时, 云顶除了需具备低温特征外, 低温云像元还具有一定的稳定性。利用 10 分钟地面降水资料, 配合地面观测前 1 小时内的平均 10 分钟观测间隔的高时间分辨率卫星观测数据, 推知地面有大降水产生时, 云顶部像元亮温具有或是持续降低, 或是维持低温状态的特征。

(3) 利用红外窗区通道、水汽通道亮温及两个通道亮温差在前后观测时次的变化量, 构建对流初生检测指数。个例研究表明, 构建的对流初生指数可对初生对流云团进行有效监测。

由于高时间分辨率扫描观测还处于试验阶段, 获取的数据有限。在观测试验期间所观测到的强对流云团个例不多, 使得研究所用样本量有限。因此, 对于高时间分辨率扫描模式下获取的强对流云团特性还有待更多数据的进一步印证, 对流云团检测指数的阈值选取也需在采集大量样本的基础上进一步探讨。

参考文献 (References)

- Ackerman S A. 1996. Global satellite observations of negative brightness temperature differences between 11 and 6.7 μm [J]. *J. Atmos. Sci.*, 53: 2803–2812.
- Adler R F, Fenn D D. 1979. Thunderstorm vertical velocity estimated from satellite data [J]. *J. Atmos. Sci.*, 36: 1747–1754.
- 白洁, 王洪庆, 陶祖钰. 1997. GMS 卫星红外云图强对流云团的识别与追踪 [J]. *热带气象学报*, 13 (2): 158–167. Bai Jie, Wang Hongqing, Tao Zuyu. 1997. Recognition and tracing of severe convective cloud from IR images of GMS [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 13 (2): 158–167.
- Berendes T A, Mecikalski J R, Mackenzie W M Jr, et al. 2008. Convective cloud identification and classification in daytime satellite imagery using standard deviation limited adaptive clustering [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D20207, doi:10.1029/2008 JD010287.
- 方兆宝, 林珏, 吴立新, 等. 2004. 用改良的面积重叠法自动跟踪中尺度对流系统的试验研究 [J]. *大气科学*, 28 (4): 634–640. Fang Zhaobao, Lin Hui, Wu Lixin, et al. 2004. A study of automatic tracking mesoscale convective systems with improved area overlapped method. [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (4): 634–640.
- Hill J. 1991. *Weather from Above: America's Meteorological Satellites* [M]. Washington: Smithsonian Institution Press, 89pp.
- Hovmöller E. 1949. The trough-and-ridge diagram [J]. *Tellus*, 1 (2): 62–66.
- 江吉喜, 范梅珠. 2002. 夏季青藏高原上的对流云和中尺度对流系统 [J]. *大气科学*, 26 (2): 263–270. Jiang Jixi, Fan Meizhu. 2002. Convective cloud and mesoscale convective systems over the Tibetan Plateau in summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26 (2): 263–270.
- McCann D W. 1983. The enhanced-V: A satellite observable severe storm signature [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 111: 887–894.
- Mecikalski J R, Bedka K M. 2006. Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving convection in daytime GOES imagery [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134: 49–78.
- Mecikalski J R, Bedka K M, Paech S J, et al. 2008. A statistical evaluation of GOES cloud top properties for nowcasting convective initiation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136: 4899–4914.
- Minnis P, Young D F. 2000. Cloud microphysical properties derived from geostationary satellite data [C]. *Proc. EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' Conf. 2000, Bologna, Italy, EUMETSAT*, 299–305.
- Riehl H, Schleusener R A. 1962. On identification of hailbearing clouds from satellite photographs [R]. *Atmospheric Science Tech. Paper 27*, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, 7pp.
- Schmetz J, Tjemkes S A, Gube M, et al. 1997. Monitoring deep convection and convective overshooting with METEOSAT [J]. *Adv. Space Res.*, 19: 433–441.
- Setvak M, Doswel C. 1991. The AVHRR channel 3 cloud top reflectivity of convective storms [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119: 841–847.
- Strabala K I, Ackerman S A, Menzel W P. 1994. Cloud properties inferred from 8–12 μm data [J]. *J. Appl. Meteor.*, 33: 212–229.
- 王登炎, 周筱兰, 李德俊, 等. 1998. 暴雨云团演变过程的模式识别 [J]. *武汉大学学报(自然科学版)*, 44 (5): 659–662. Wang Dengyan, Zhou Xiaolan, Li Dejun, et al. 1998. Pattern recognition of evolution of heavy rain cloud clusters [J]. *Wuhan University Journal (Natural Science Edition) (in Chinese)*, 44 (5): 659–662.
- 朱亚平, 程周杰, 刘健文. 2009. 一次锋面气旋云系中强对流云团的识别 [J]. *应用气象学报*, 20 (4): 428–436. Zhu Yaping, Cheng Zhoujie, Liu Jianwen. 2009. Detection and analysis on deep convective clouds in a frontal cyclone using multispectral remote sensing data [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 20 (4): 428–436.