

基于卫星资料的对流初生预报及效果评估

李五生^{1,2} 王洪庆^{1,†} 王玉¹ 吴琼¹

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 2. 中国洛阳电子装备试验中心, 洛阳 471000;

† 通信作者, E-mail: hqwang@pku.edu.cn

摘要 利用 MTSAT-1R 卫星资料中的红外 1、红外 2 和水汽通道亮温数据, 在目标云块识别对比的基础上计算对流初生(CI)预报的 8 个指标值。根据京津地区的实际情况, 给出修正后的预报指标阈值, 并对 2006—2007 年京津地区进行 17 日次对流初生预报实验。实验结果表明, 该预报方法能够对 1 小时内的对流初生现象进行有效预报。结合云导风矢量给出检验预报结果的方法, 对该预报方法的预报效果进行量化统计。统计结果表明, 该方法预报对流初生的 TS (threat score) 评分为 0.545, 检测概率(POD)为 0.654, 空报率(FAR)为 0.435。

关键词 卫星资料; 对流初生预报; 效果评估

中图分类号 P405

Convective Initiation Forecasting and Statistical Evaluation Based on Satellite Data

LI Wusheng^{1,2}, WANG Hongqing^{1,†}, WANG Yu¹, WU Qiong¹

1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871;

2. Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471000; † Corresponding author, E-mail: hqwang@pku.edu.cn

Abstract Eight forecast factors of convective initiation (CI) are calculated by using IR1, IR2 and WV TBB of MTSAT-1R satellite data based on target clouds identification. The critical values of forecast factors are proposed in Beijing-Tianjin region, and the 17 days test of convective initiation forecast in Beijing-Tianjin region during 2006 and 2007 is carried out. Results of the test show that this method of CI forecast can well forecast the CI occurs in the next one hour. The method of CI forecast results evaluation is proposed base on the atmospheric motion vectors, and a statistical analysis of the CI forecast results is conducted. Statistical results show that this CI forecast method has good TS score of 0.545, high POD of 0.654 and low FAR of 0.435.

Key words satellite data; convective initiation forecast; statistical evaluation

强对流天气是一种严重的灾害性天气, 是天气预报业务中最重要的预报内容之一。对强对流天气的准确预报对于公共安全、减灾抗灾和军事行动等方面具有重要意义^[1-2]。对流初生(convective initiation, CI)的预报是强对流天气预警的基础, 研究 CI 的预报具有较大的实际应用价值。卫星资料具有覆盖范围广、时空分辨率高和资料完整等特点, 利用静止卫星资料进行 CI 预报具有其他气象资料无法比拟的优点。CI 的定义是首次在多普勒雷达回波

图上监测到回波强度大于 35 dBZ 的点^[2], 采用 35 dBZ 这个标准是因为这样的降水强度与对流性积云的对应关系非常好。

2003 年, Roberts 等^[3]利用卫星云图特征识别算法对云进行分类, 进行积云发展的早期检测, 同时也通过红外通道云顶亮温的变化监测积云的增长和对流的发展。2006 年, ASAP (Aviation Safety Action Partnership)小组发展了一套基于云类型识别的 CI 预报系统^[4]。2006 年, Mecikalski 等^[5]首先提出

基于地球静止气象卫星资料的 CI 预报方法, 采用美国 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) 静止气象卫星水平空间分辨率为 4~8 km 的红外通道资料, 通过获得各个红外通道的亮温 (IR-TBB), 计算 8 个预报指标来预报未来 0~1 小时内的 CI, 并对在美国地区进行了 CI 预报实验。他们所提出的 8 个指标及其阈值见表 1。

表 1 Mecikalski 等^[5]方法的 CI 预报指标及阈值
Table 1 CI forecast factors and critical values of the method of Mecikalski et al.^[5]

序号	CI 预报指标	预报指标的判断阈值
F1	IR1 亮温值	<0℃
F2	WV 与 IR1 亮温差	-35℃~-10℃
F3	IR2 与 IR1 亮温差	-25℃~-5℃
F4	IR1 亮温变化率	<-4℃/(15 min)
F5	IR1 亮温变化率	$\Delta T/(30 \text{ min}) < \Delta T/(15 \text{ min})$
F6	IR1 亮温降低至 0℃的时间	<30 min
F7	WV 与 IR1 亮温差变化率	>3℃/(15 min)
F8	IR2 与 IR1 亮温差变化率	>2℃/(15 min)

如果在一个云图的像素点中, 以上 8 个指标符合至少 7 个, 则认为该点可能在未来 1 小时内发生 CI。2012 年, 刘京华等^[7]采用 Mecikalski 等的方法, 从卫星资料中提取预报指标, 对京津地区的一次强对流个例进行了初步的预报实验。本文研究的目的是对 Mecikalski 等的方法进行本地化应用, 通过多次 CI 预报实验, 给出预报实例, 并统计评估该方法在京津地区的预报效果。

1 资料及方法

1.1 所用资料

本文使用日本 MTSAT-1R 静止气象卫星资料进行 CI 预报实验。MTSAT-1R 卫星定位在 140°E 赤道上空, 可以对中国中东部地区进行连续观测。卫星资料格式为标称投影(NOM) HDF5 格式, 数据通道和星下点分辨率见表 2。

理论上, 卫星扫描时间越短越有利于 CI 的监测和预报。MTSAT-1R 的最短扫描时间间隔为 30 min。另外, 为了计算方便, 首先将 MTSAT-1R 卫星资料中的红外 1、红外 2 和水汽通道数据采用反距离加权平均方法进行空间插值, 形成 0.05°×0.05°等经纬度网格数据。后续的 CI 预报指标计算和预报效果评估都是基于等经纬度网格数据进行的。

表 2 MTSAT-1R 卫星通道
Table 2 Channels of MTSAT-1R

通道	波长范围/μm	星下点分辨率/km
可见光(VIS)	0.55~0.90	1
红外 1 (IR1)	10.3~11.3	4
红外 2 (IR2)	11.5~12.5	4
水汽(WV)	6.5~7.0	4
红外 4 (IR4)	3.5~4.0	4

采用天津塘沽雷达站(117.725°E, 39.044°N)的 CINRAD-SA 雷达数据确定 CI 的发生位置和时间。该雷达海拔高度为 70.3 m。CINRAD-SA 雷达是我国正在布网的新一代多普勒天气雷达, 由我国敏视达公司研制。CINRAD-SA 雷达吸收了美国新一代天气雷达 NEXRAD 的优点, 并采用计算机技术和微电子技术的最新成果, 能够满足连续运转、无人值守等要求, 具有较高的精确度。它的可靠性和实用性均比以前的雷达有质的飞跃, 对暴雨、冰雹等强对流天气具有很强的监测能力, 总体性能达到国际先进水平。该雷达的工作波段为 10 cm, 最大探测半径为 460 km, 水平空间分辨率为 1 km × 1 km, 时间分辨率为 6 min。数据产品主要包括反射率因子、径向速度、速度谱宽等。本文主要采用反射率因子来确定 CI 的发生时间和位置。

1.2 实际 CI 的获取

采用 TITAN (thunderstorm identification, tracking, analysis and now casting)算法获取 CI 的位置和时间。TITAN 是美国国家大气研究中心(NCAR)基于天气雷达开发的风暴识别、跟踪、分析和邻近预报算法, 该算法可以对雷达回波数据中的强对流运动路径进行识别和跟踪, 得到一条运动路径。如果采用跟踪回波的阈值为 35 dBZ, 则得到的运动路径的起点即为 CI 的位置, 该位置所对应的时间即为 CI 发生的时间, 如图 1 所示。

1.3 CI 预报方法

采用文献[5]的方法, 利用卫星资料计算 8 个预报指标。由于 8 个预报指标中与时间变化有关的指标是采用 15 min 时间间隔的云图资料进行计算的, 而本文采用的是 30 min 时间间隔的云图资料, 因此在使用的时候需要对指标的阈值进行适当调整。本文对预报指标采用不同的阈值进行多次预报实验, 并与实际 CI 进行比较, 发现采用表 3 中的阈值所得到的预报效果较好。

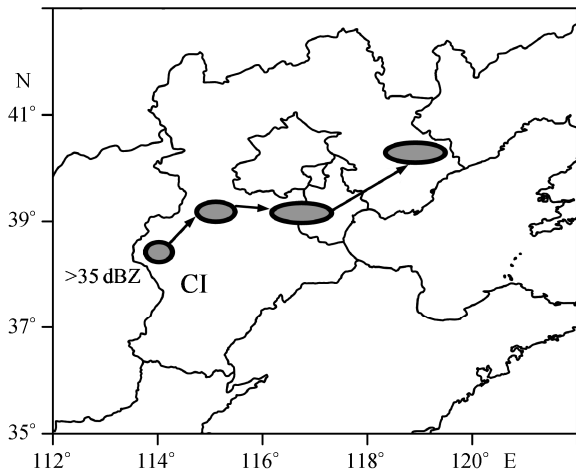


图 1 CI 实际数据的获取
Fig. 1 CI data acquisition

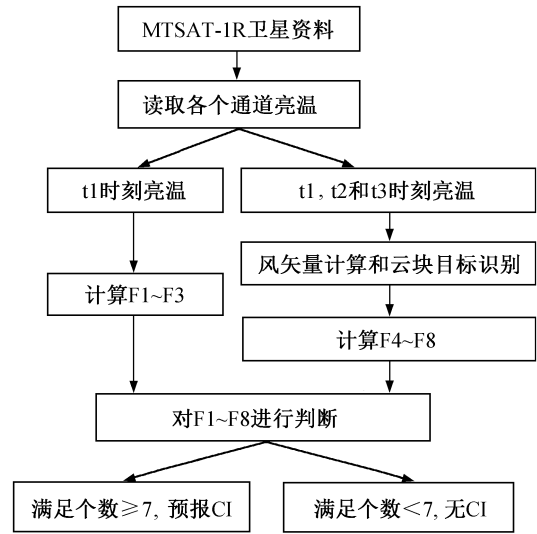


图 2 CI 预报流程
Fig. 2 Flow chart of CI forecast

表 3 本文采用的 CI 预报指标及阈值
Table 3 CI forecast factors and critical values in this paper

序号	CI 预报指标	预报指标的判断阈值
F1	IR1 亮温值	<0°C
F2	WV 与 IR1 亮温差	-37~-10°C
F3	IR2 与 IR1 亮温差	-25~-5°C
F4	IR1 亮温变化率	<5.5°C/(30min)
F5	IR1 亮温变化率	$\Delta T/(60 \text{ min}) < \Delta T/(30 \text{ min})$
F6	IR1 亮温降低至 0°C 的时间	<30 min
F7	WV 与 IR1 亮温差变化率	>3.5°C/(30 min)
F8	IR2 与 IR1 亮温差变化率	>2.5°C/(30 min)

在以上预报指标中，F1~F3 与时间变化无关，可以由同一时次的卫星资料红外亮温数据获得。F4~F8 与时间变化有关，需要从 3 个不同时次的卫星资料中识别出同一云块，然后分别获取不同时次的红外亮温数据进行计算。预报流程如图 2 所示，其中 t1 表示最近时刻，t2 表示次近时刻，t3 表示最远时刻，依次间隔 30 min。

2 CI 预报实验

2.1 云块目标的识别

本文采用相关系数法和距离法相结合的方法，从两个不同时次的云图上识别出同一个云块。交叉相关法可以判断两个目标云块的相似程度，两个目标云块的相关系数越大，两者越相似。最短距离法可以判断两个目标云块的相近程度，两个目标云块的距离越小，两者越相近。相关系数 r 和距离 d 可分别由式(1)^[8]和式(2)^[9]计算：

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}, \quad (1)$$

$$d = \sum |x_i - y_i|. \quad (2)$$

为了同时考虑目标云图区域的相似程度和靠近程度，把相关系数和距离结合起来，得到一个新的参数 R ，定义为

$$R = \frac{r}{d}. \quad (3)$$

R 参数综合考虑了两个目标云块的相似和靠近程度，本文采用 R 最大的方法进行云块目标区域识别，如图 3 所示。

图 3 中阴影部分为云，实线方框为 t1 时刻的目标云块，本文中限定目标云块为 16×16 个像素。在

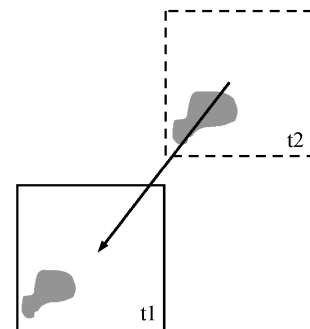


图 3 云块识别
Fig. 3 Clouds identification

t2 时刻的卫星资料中搜索目标云块, 搜索范围限定在目标云块中心点附近 64×64 像素范围内。在此范围内, 计算每个 16×16 像素区域与目标云块的 R 参数, 由最大 R 参数确定 t2 时刻目标云块的位置。应用此方法同样可以得到 t3 时刻目标云块的位置, 最终得到同一目标云块在 t1, t2 和 t3 时刻的位置。同时根据 t1 和 t2 时刻目标云块的位置, 计算云导风的方向和大小, 为后续预报结果的评估分析提供基础。

2.2 预报指标的计算

通过上面的方法, 获得同一云块在连续 3 个时刻 t1, t2 和 t3 时刻的位置, 则 F1~F8 可以由式 (4)~(11)^[4-5] 进行计算, 其中上角标表示卫星通道, 下角标表示时间。

$$F1 = T_{t1}^{IR1}, \tag{4}$$

$$F2 = T_{t1}^{WV} - T_{t1}^{IR1}, \tag{5}$$

$$F3 = T_{t1}^{IR2} - T_{t1}^{IR1}, \tag{6}$$

$$F4 = T_{t2}^{IR1} - T_{t1}^{IR1}, \tag{7}$$

$$F5 = T_{t3}^{IR1} - T_{t1}^{IR1}, \tag{8}$$

$$F6 = (T_{t1}^{IR1} < 0) \& (T_{t2}^{IR1} > 0), \tag{9}$$

$$F7 = (T_{t1}^{WV} - T_{t1}^{IR1}) - (T_{t2}^{WV} - T_{t2}^{IR1}), \tag{10}$$

$$F8 = (T_{t1}^{IR2} - T_{t1}^{IR1}) - (T_{t2}^{IR2} - T_{t2}^{IR1})。 \tag{11}$$

2.3 京津地区 CI 预报实验

用上述方法对京津地区 2006 年 8 月 13 日 16:00 和 2007 年 7 月 8 日 19:00 进行 CI 预报实验, 结果如图 4 所示。

图 4 中, 白色箭头代表云导风矢量, 绿色点代

表预报的 CI 点, 红色点代表 0~1 小时内实际发生的 CI 点。实际发生的 CI 位置由天津塘沽站多普勒雷达数据获得。从图 4 可以看到, 绿色点通常处于红色点的云导风上游, 可以解释为预报点在云导风的方向上运动了一段时间后, 在红色点处发生 CI。

通过对比发现, 大多数的 CI 预报点与真实的 CI 发生点相对应。一般情况下, CI 预报点在真实 CI 发生点的云导风上游, 说明 CI 预报点随着云导风的运动, 经过一段时间以后到达下游的某个位置并发生 CI。这既说明本预报方法的有效性, 同时也提醒我们在采用本方法进行 CI 预报的时候, 一般不宜直接将预报点作为 CI 的发生位置, 要充分考虑 CI 预报点的移动。

同时, 在预报结果中也可以发现, CI 的预报点大多位于云的边缘地区, 这是由云的边缘地区水汽丰沛, 上升运动强烈造成的。空报的 CI 点通常是由于水汽不足导致该预报点不能发展为 CI, 漏报的 CI 点通常是由于 CI 发展比较快, 以至卫星云图的时间分辨率不足以发现该 CI 点。

3 预报结果的评估

从前面的预报实验可以看到, 该预报方法对京津地区发生的 CI 具有较好的预报效果, 预报个例中 CI 预报点与实际发生的 CI 有着良好的对应关系。为了客观评价上述预报方法的效果, 我们利用该预报方法对 2006—2008 年间京津地区的 CI 进行预报实验, 并统计分析预报结果的 TS (threat score) 评分、检测概率 POD (probability of detection) 和空

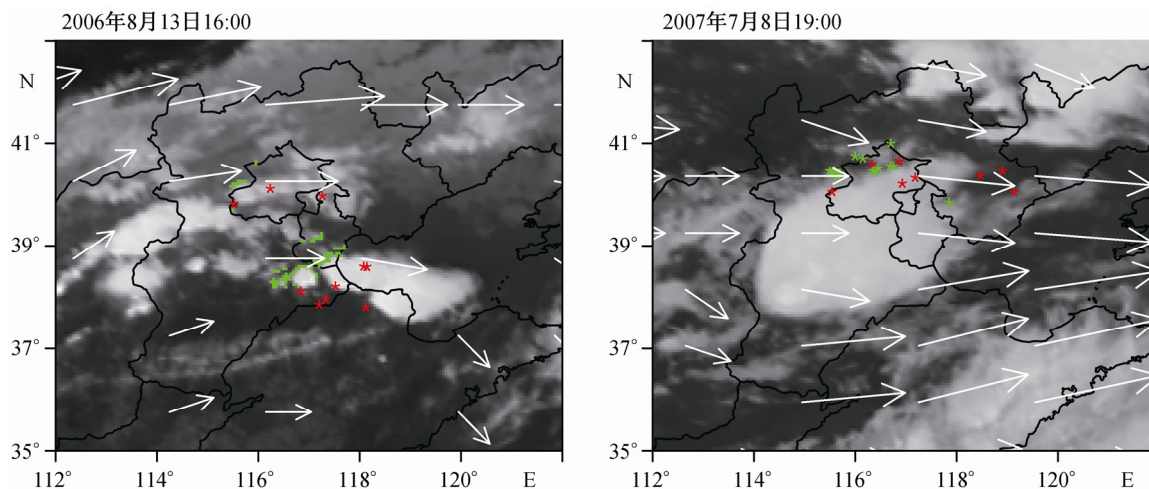


图 4 CI 预报实验结果
Fig. 4 Results of CI forecast test

报率 FAR (false alarm ratio)。TS 评分是降水预报中常用的预报技巧评判参数，表示降水天气的综合预报准确率。POD 代表实际发生的 CI 天气现象被预报出来的概率，但没有对虚报的 CI 预报点予以考虑。FAR 表示在预报的 CI 点中虚报的概率。这 3 个参数各有侧重点，结合起来使用可以对一个预报方法的整体预报效果做完整的评估。假设 N_A 为预报正确点， N_B 为空报点， N_C 为漏报点， N 为实际发生的 CI 数，则 TS 评分、POD 和 FAR 可以分别由式(12)~(14)^[10]计算：

$$TS = N_A / (N_A + N_B + N_C), \quad (12)$$

$$POD = (N - N_C) / N, \quad (13)$$

$$FAR = N_B / (N_A + N_B). \quad (14)$$

需要指出的是，本文中 CI 是由卫星资料进行预报的，该方法得到的 CI 预报点位置是像素点的位置，通过卫星资料的定位可以得到 CI 预报点的经纬度。与之对比，实际发生的 CI 是由 1 小时内的雷达数据获得的。在这段时间内，CI 预报点的位置会随着云的运动而发生变化，因此预报点的位置应该在实际发生的 CI 位置的上游，它们之间的距离应该是云导风在这段时间内通过的距离。考虑到云导风的方向和速度可能会发生变化，本文采用以下方法判断 CI 预报的正确与否。

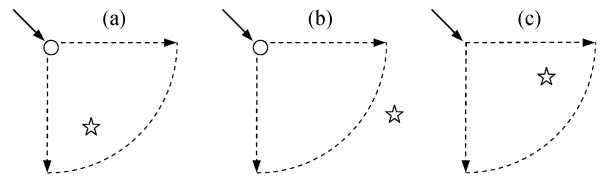


图 5 CI 的正确预报(a)、空报(b)和漏报(c)
Fig. 5 Correct forecast (a), false alarm (b) and omission (c) of CI

图 5 中，圆圈代表预报的 CI，五角星代表实际发生的 CI，实线箭头代表云导风矢量，虚线扇形是以 CI 预报点为圆心，云导风矢量与时间之积的 2.0 倍为半径，且扇形的两个边与云导风矢量的夹角均为 45°。图 5(a) 表示预报正确，实际发生的 CI 在虚线扇形范围之内；图 5(b) 表示空报，即预报点没有对应实际发生的 CI；图 5(c) 表示漏报，即实际发生了 CI，但是没有预报点与之对应。考虑到强对流云团经常发生分裂和合并，允许多个预报点对应同一个实际发生的 CI 点，同时也允许一个预报点对应多个实际发生的 CI 点。

用以上方法对 2006—2007 年京津地区进行 17 日次 CI 预报实验。实验中，实际发生的 CI 共 136 个。对应卫星云图中，预报 CI 像素点共 1018 个，预报正确 575 个，空报 443 个，漏报 47 个。计算出的 TS 评分、POD 和 FAR 见表 4。

表 4 TS 评分、POD 和 FAR
Table 4 TS score, POD and FAR

时间	N_A	N_B	N_C	CI 个数	TS 评分	POD	FAR
2006-06-07 12:00	161	28	0	7	0.852	1.000	0.148
2006-06-13 11:00	5	1	3	7	0.556	0.571	0.167
2006-06-14 19:00	17	25	1	4	0.395	0.750	0.595
2006-06-24 16:00	3	30	3	4	0.083	0.250	0.909
2006-06-25 16:00	45	16	8	19	0.652	0.579	0.262
2006-06-26 18:30	30	104	2	4	0.221	0.500	0.776
2006-07-05 22:30	7	0	1	5	0.875	0.800	0
2006-07-14 10:00	100	127	12	22	0.418	0.455	0.560
2006-07-26 13:00	2	1	3	5	0.333	0.400	0.333
2006-08-13 16:00	79	12	2	10	0.850	0.800	0.132
2006-08-25 17:30	25	0	1	8	0.962	0.875	0
2007-06-23 16:00	9	48	7	9	0.141	0.222	0.842
2007-06-24 12:00	22	11	0	6	0.667	1.000	0.333
2007-07-07 11:00	1	0	0	2	1.000	1.000	0
2007-07-08 19:00	9	8	1	8	0.500	0.875	0.471
2007-07-10 19:00	29	21	1	12	0.569	0.917	0.420
2007-08-09 23:00	32	10	0	4	0.762	1.000	0.238
总计(平均)	575	443	47	136	0.545	0.654	0.435

从表 4 可以看到, 本预报方法的 TS 评分、POD 和 FAR 比较稳定。17 次预报实验中, TS 评分低于 0.3 的有 3 次, POD 低于 0.5 的有 4 次, FAR 大于 0.5 的有 5 次。该方法对于 1 小时内发生的 CI 能够以较大的概率进行预警。影响该方法预报效果的因素主要有卫星资料的时间空间分辨率和云块目标的识别算法。更高时间分辨率的卫星资料有助于更早地发现 CI 云团, 更高空间分辨率的卫星资料有助于发现尺度更小的 CI 云团。CI 预报方法的关键是要找到连续 3 个不同时刻的同一云块的位置, 只有云块识别准确, 才能准确计算 CI 预报指标, 得到更好的预报效果。

4 总结

CI 预报一直是临近天气预报中的一个难点, 它的准确预报对整个强对流天气系统的预报具有重要意义。本文利用静止气象卫星资料, 在对文献中 8 个预报指标进行修正的基础上, 对京津地区的 CI 进行预报实验, 并对预报结果进行统计分析。分析预报结果时考虑了云导风的影响, 使统计结果更加客观准确。从分析结果来看, 该方法预报 CI 的 TS 评分为 0.545, POD 为 0.654, 空报率 FAR 为 0.435, 整体预报效果与文献[6]中的统计结果(TS 评分=0.26, POD=0.65, FAR=0.69)接近, 说明采用该方法可以比较有效地对京津地区未来 1 小时内的 CI 进行预警, 具有实际应用价值。目前, 大部分气象台站都可以接收到扫描时间间隔为 30 min 的卫星资料, 因此可以将该方法用于 CI 的业务预报中, 以提高气象台站对 CI 的预报能力。

本文仅对京津地区的 CI 进行了预报实验和统计分析, 若在其他地区采用该方法进行 CI 预报, 可对预报指标或者预报指标的阈值进行适当调整, 以适应当地的天气特点。同时, 下一步的 CI 预报

研究应该着重考虑云块识别算法的改进以及红外 4 通道数据的应用。

参考文献

- [1] 蒋尚城. 应用卫星气象学. 北京: 北京大学出版社, 2006: 2-12
- [2] 寿邵文, 杜秉玉, 肖稳安, 等. 中尺度对流系统及其预报. 北京: 气象出版社, 1993: 182-192
- [3] Roberts R D, Rutledge S. Nowcasting storm initiation and growth using GOES-8 and WSR-88D data. *Weather and Forecasting*, 2003, 18(4): 562-584
- [4] Siewert C W, Koenig M, Mecikalski J R. Application of Meteosat second generation data towards improving the nowcasting of convection initiation. *Meteorol Appl*, 2000, 17: 442-451
- [5] Mecikalski J R, Bedka K M. Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery. *Monthly Weather Review*, 2006, 134: 49-78
- [6] Mecikalski J R, Bedka K M. A statistical evaluation of GOES cloud-top properties for now-casting convective initiation. *IHOP Boundary Layer Processes*, 2008, 136: 4899-4914
- [7] 刘京华, 王彬, 韩雷, 等. 京津地区一次强对流天气的初生预警技术研究. *北京大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(1): 42-46
- [8] Leese J A, Novak C S, Clark B B. An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation. *Journal of applied meteorology*, 1971, 10: 118-132
- [9] 龙智勇, 石汉青, 黄思训. 利用卫星云图反演云导风的新思路. *物理学报*, 2011, 60(5): 840-845
- [10] 周兵, 赵翠光, 赵声蓉. 多模式集合预报技术及其分析与检验. *应用气象学报*, 2006, 17(增刊 1): 104-109