

基于气象卫星对贵阳机场一次MCS过程识别研究

娄欣悦, 宋 媛, 李俊瑶

民航贵州空管分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年11月7日; 录用日期: 2023年12月29日; 发布日期: 2024年1月9日

摘 要

中尺度对流系统(MCS)常伴有冰雹、雷暴、龙卷等强烈的对流性灾害天气的产生, 对飞行安全及航班准点率有严重影响, 当飞机误入其中, 对机体结构造成巨大损坏的同时对机组和乘客的人身安全造成威胁。本文研究基于葵花八号气象卫星的MCS识别, 对贵阳机场2023年3月16日一次天气过程进行MCS识别, 主要根据前人所改进的MCS识别标准, 运用python对葵花八号静止气象卫星提供的数据实现计算机自动识别MCS, 不仅可以降低由于人工识别带来的主观误差, 还为气象工作人员对强对流天气的预报起到辅助作用。

关键词

中尺度对流系统(MCS), 葵花八号气象卫星, 贵阳机场, 自动识别

Research on the Identification of a MCS Process at Guiyang Airport Based on Meteorological Satellites

Xinyue Lou, Yuan Song, Junyao Li

Guizhou Air Traffic Control Sub-Bureau of CAAC, Guiyang Guizhou

Received: Nov. 7th, 2023; accepted: Dec. 29th, 2023; published: Jan. 9th, 2024

Abstract

Mesoscale convective systems (MCS) are often accompanied by strong convective disasters such as hail, thunderstorms, and tornadoes, which have a serious impact on flight safety and punctuality.

When an aircraft enters them by mistake, it causes significant damage to the aircraft structure and poses a threat to the personal safety of the crew and passengers. This article studies the MCS recognition based on the Himawari-8 meteorological satellite, and conducts MCS recognition for a weather process at Guiyang Airport on March 16, 2023. Based on the previously improved MCS recognition standard, Python is used to automatically recognize MCS from the data provided by the Himawari-8 stationary meteorological satellite. This not only reduces subjective errors caused by manual recognition, but also assists meteorological personnel in predicting severe convective weather.

Keywords

Mesoscale Convective Systems (MCS), Himawari-8 Meteorological Satellite, Guiyang Airport, Automatic Identification

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

贵阳龙洞堡机场位于贵州省贵阳市东郊区, IATA 代码 KWE, ICAO 代码 ZUGY。2023 年 3 月 16 日, 北京时间 19:22~23:46 贵阳机场出现弱到中雷雨天气, 期间 21:56~22:12 本场出现小冰雹天气, 在 21:46 出现最大阵风达 23 米/秒, 此次过程降水量 46.2 毫米, 最大冰雹直径 15 mm, 重量 1 g。因本场天气原因共有 38 个航班备降, 15 个航班延误。

由于现代民航客机的飞行速度快, 续航距离长, 而气候具有瞬息万变的特点, 在飞行过程中无论是哪种天气状况的变化都会对航空器的运动产生影响。然而, 中小尺度系统是一种大规模、持续时间长、具有强烈对流性质的气象系统, 强对流天气会伴随雷暴、大风、冰雹等天气, 导致空域的通行能力急速下降及大面积的航班延误, 对民航运输的安全与效率造成严重影响, 因此, 准确、有效地去识别和观测 MCS (Mesoscale Convective System, 简称 MCS) 卫星云图的地理位置具有重要的现实意义, 可以大大减少飞行的事故率, 提前对 MCS 进行识别并监视可以有效地安排航线。由于人工识别 MCS 也存在很大的误差, 对流云周围的卷云系会影响人工识别对流云, 人工识别和处理对流云边界时也会对对流云边界造成一定的影响, 所以采用计算机自动识别 MCS 不仅可以增强识别率还可以对气象工作人员的工作起到很好的辅助作用。故本文的研究旨在充分参照国外学者 Maddox [1] 等人提出的对 MCS 识别定义的理论基础上, 结合国内学者费增坪、王洪庆等[2] 人所提出和改进的 MCS 识别判定标准, 利用计算机对葵花八号静止气象卫星下的 MC 进行自动识别, 从而做到高效、准确的识别对流云, 在对流天气来临时对预报提供参考作用, 并根据分析卫星云图辨识航道所经气象条件, 以保证飞行过程中不受气象影响。

早期对我国 MCS 云团地理特征的研究主要有李玉兰, 王倩熔, 郑新江[3] 等在 Maddox 的定义的基础上, 对 1983 年至 1986 的 GMS 图像资料综合分析, 发现我国的 MCC 数量较少, 生命周期较短。在 MCS 云团识别分析方面, 白洁等[4] 提出了阈值剔除和区域平滑滤波相结合的方法可将强对流云有效的分离开来。黄勇等[5] 通过选择三个不同等级亮温阈值, 在多方统计的基础上, 进行多阈值识别对流云, 一步步有效地准确识别出较多的对流云团, 但此种识别方法在卫星云图边界的识别方面还存在一些不足需要改进。由于 MCS 只有 2 到 2500 km 左右的小空间尺度, 时间范围也不长, 少则十几分钟, 最长也常不超过一天, 而气象卫星具有广覆盖、实时性强等优点, 通过使用时空分辨率高的静止卫星云图相比常规的资

料更容易监视到这种系统，通过查看红外卫星云图，不仅可以观测到大范围的云系分布，对中小尺度、时间较长的云团发展过程也可以做到有效监控。本论文选取贵阳机场为研究对象，对其 2023 年 3 月 16 日一次 MCS 过程进行了识别，为航班运行和气象预报提供重要参考。

2. 数据和方法

2.1. 数据

亮度温度(T_{BB})，定义为以黑体温度发射的辐射等同于测量到物体的辐射发射的辐射，则黑体温度为实例物体的亮度温度，即黑体的辐射亮度温度。也可以由静止气象卫星通过红外通道探测地表或云顶时的辐射量来表示亮温，此值的大小可以反映 MCS 云区的对流强度，当亮温值越小，云层高而厚且对流强度发展旺盛[6]。

本文使用的对流资料主要来自贵阳机场 2023 年 3 月 16 日的日本葵花八号(Himawari-8)气象卫星的 TBB 亮温数据，并结合实时的雷达回波数据和地面观测数据进行分析。

2.2. 识别标准

Maddox 于 1980 年从美国堪萨斯州卫星服务站提供的增强显示红外卫星云图中识别出一种 α 中尺度对流系统，并把这种对流系统定义为中尺度对流复合体(MCC)。次年，Maddox 通过详细研究和分析对 MCC 给出定义。而在国内外学者对 Maddox 定义的 MCC 判别标准进行详细研究分析后，发现此判定标准过于严格，因此许多研究人员根据各国实际情况对 MCS 的判别标准做了修订。项续康、江吉喜等[7]从十个典型的 MCC 案例结果中发现我国的 MCS 在生命周期较长于美国的，而椭圆率相对小一些，故将 MCC 判别标准中冷云区最大面积时的椭圆率改 ≥ 0.6 。马禹，王旭[8]等(1997)根据 Orlanski 的尺度分类标准，率先提出将 $M\beta CS$ 定义为 $TBB \leq -32^\circ C$ ，且短轴长度为 1.5 至 3.0 个纬距的连续的冷云区。本文将采用费增坪，郑永光[2]所改进的识别 MCS 标准对 MCS 识别方法进行研究。如表 1 所示。

Table 1. Identification criteria for MCS

表 1. MCS 的识别判据

	物理特征
尺度	小于等于 $-32^\circ C$ 的红外温度的云区面积 $\geq 10^5 km^2$ 或小于等于 $-52^\circ C$ 温度的内部冷云区的面积 $\geq 6400 km^2$
开始时	尺度定义首先满足
生命期	满足尺度定义的时期 ≥ 1 小时
成熟期	连续冷云区面积达到最大尺度
外形	椭圆形，在最大范围时刻椭圆率 ≥ 0.5
结束时	尺度定义不再满足

2.3. MCS 识别算法 - 阈值法

由于将灰度图进行二值化的运算量小，并且在处理后也可以很好的体现灰度图像的关键特征，因此被广泛使用。将灰度图像二值化最常用的处理方法之一就是阈值法，设定阈值从而可以得到一个二值化的黑白图。

红外卫星云图是一幅温度分布图，对流云的云顶亮度温度在不同的发展阶段、季节和地区的情况下也有很大的差异，所以在阈值的选择上也有一些影响。本文选用阈值法对卫星云图上的 MCS 进行识别，

结合实验，得出最佳亮度阈值。

2.3.1. 阈值剔除

首先将数据矩阵转化为灰度图像，对灰度图像使用均值滤波再使用中值滤波对图像进行预处理，通过设定亮度阈值可将灰度级图像转化为二值化图像并将一些非对流云进行剔除[9]。

从 210 开始对阈值进行设定，将云图中大于阈值 210 的云团区域进行保留，而小于阈值 210 的云团区域进行剔除，如图 1(b)所示，从图中可知，即使一些亮度较暗的非对流云被剔除，还是会有一些亮度稍高的非对流云被保留下来了。通过采取 215、220、225 这几个红外对流云顶温度为阈值，对处理过的卫星云图进行二值化，从而得到依次为图 1(c)、图 1(d)、图 1(e)这三个图像，并且对 MCS 识别判据中的 -52°C ，即 K 氏温度 221.15 进行阈值设定，识别出来的图像为图 1(f)。将图 1(b)到图 1(f)这几张放在一起做对比分析可知，当阈值增大时，被保留下来的对流云在减少，而阈值过小时，非对流云系也未被完全剔除，从这几张不同阈值识别出来的对流云图中可以看出，由于图 1(f)的阈值也是 MCS 识别判据中的亮温，相比较其它阈值也可以较好的保留云图 MCS 云团的信息，故阈值大小取 221.15 最为合适。

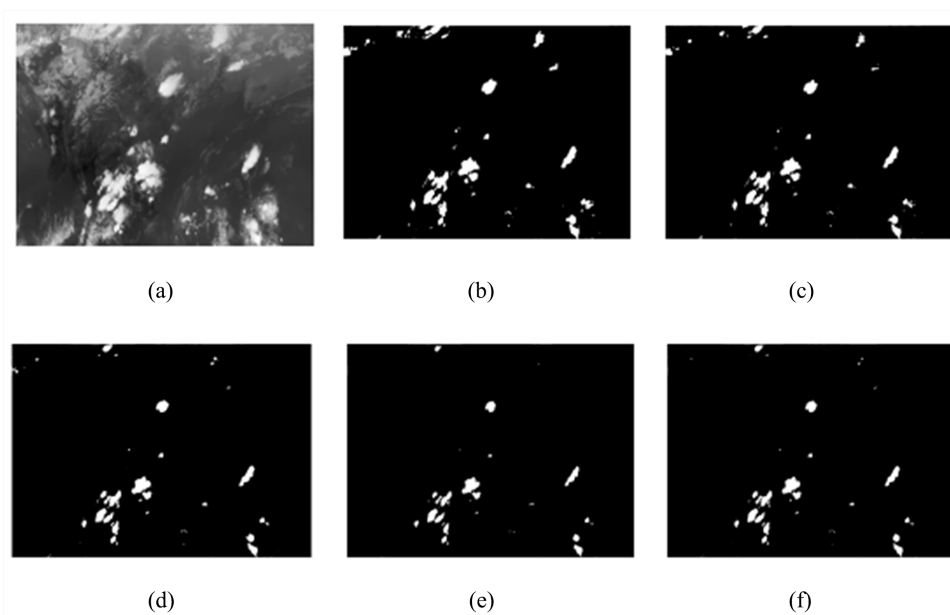


Figure 1. Luminance threshold of convective clouds
图 1. 对流云亮度阈值

2.3.2. 边缘检测

由于冬季一些高度高、云层厚的层状云也可能具有 Maddox 定义的类似 MCS 云团的特征，通过采用类似 canny 的边缘监测算子的边界监测方法对识别者中提取出来 MCS 云团的特征进行灰度和边界的监测，从而得出一个灰度和梯度更大的边缘云团，将层状云和冬季 MCS 云团的特征区分开来，使得 MCS 云团的边缘识别率进一步升高。canny 的边缘监测算子实际上是一种最优的边缘检测算子，它在识别中具有低边缘误判分辨率，高边缘定位精度，一直虚假边缘的三大特点，本文利用 canny 边缘监测算子对 MCS 识别进行边缘梯度检测，其边缘梯度的阈值一般选用 0.5 [10]，检测结果如图 2 所示。计算公式如下：

$$\nabla^2 f(x, y) = f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) - 4f(x, y) \quad (1)$$

其中， $\nabla^2 f(x, y)$ 表示处理后像素点 (x, y) 处的灰度值， $f(x, y)$ 表示输入的图像具有整数像素坐标。

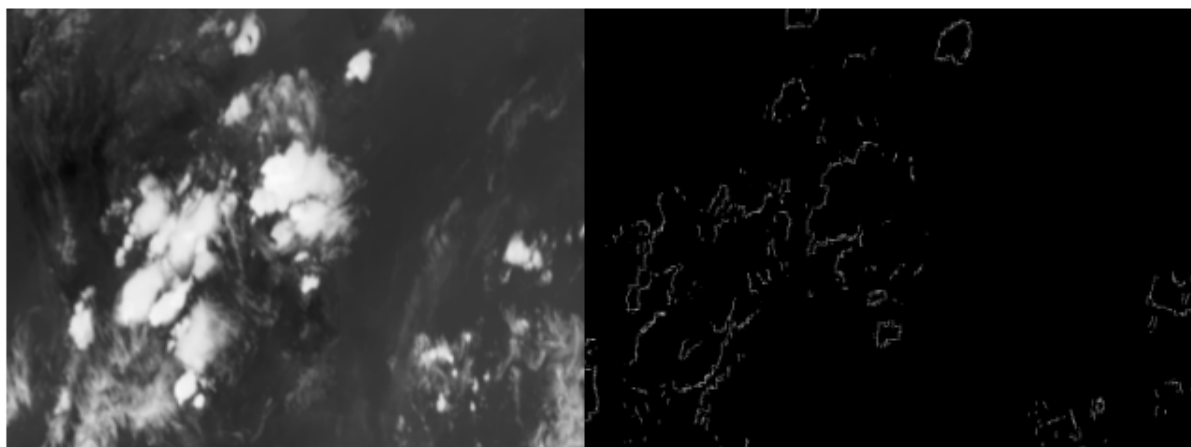


Figure 2. Example results of edge detection
图 2. 边缘检测样例结果

2.3.3. 计算特征参数并提取 MCS

根据费增坪所定义的 MCS 识别判据，对特征参数进行计算分析，保留云区面积大于 6400 km² 以及圆心率大于 0.5 的云团，因红外卫星的分辨率为 5 km，故转化为像素为 6400/(5*5) = 256，即去除像素低于 256 的云区为 MCS。此过程将在 matlab 中实现，采用区域联通的方式先对不符合面积要求的云区进行剔除，再对不符合椭圆率标准的云区进行剔除。

3. 算法实现

3.1. 天气实况

3.1.1. 地面观测实况

Table 2. Summary of weather phenomenon evolution at Guiyang Airport
表 2. 贵阳机场天气现象演变纪要栏

时间(UTC)	2023 年 3 月 16 日
	TS1122NW-1156NE-1211NE 1312NW-1134Z-1420SE-1546SE
	BR1325-1600
天气现象演变纪要栏	GA1345-1355 20(1346)340
	SHRA1344--SHRA1446-1600
	-SHGR1356-1412

根据表 2 可知，2023 年 3 月 16 日出现了雷雨、大风、冰雹天气，在 21:44~22:46 期间出现中阵雨伴雷暴天气，21:46~21:55 期间出现风速大于等于 17 m/s 的大风，在 21:46 时出现最大偏北阵风 20 m/s，在 21:54~22:12 期间出现小冰雹天气，至 23:46 对流天气结束。

3.1.2. 雷达回波实况

图 3 为 2023 年 3 月 16 日 20 时 43 分~23 时 49 分期间贵阳机场附近的雷达回波图，从图中可以看出，MCS 过程在雷达回波图上呈现为一片较大的回波区，回波强度较大，范围较广。从雷达图中可见，本次对流过程逐渐增强，回波强度达到 35 dBz 以上，并在 21:45 出现 V 型缺口，至 23:49 对流回波移出本场。

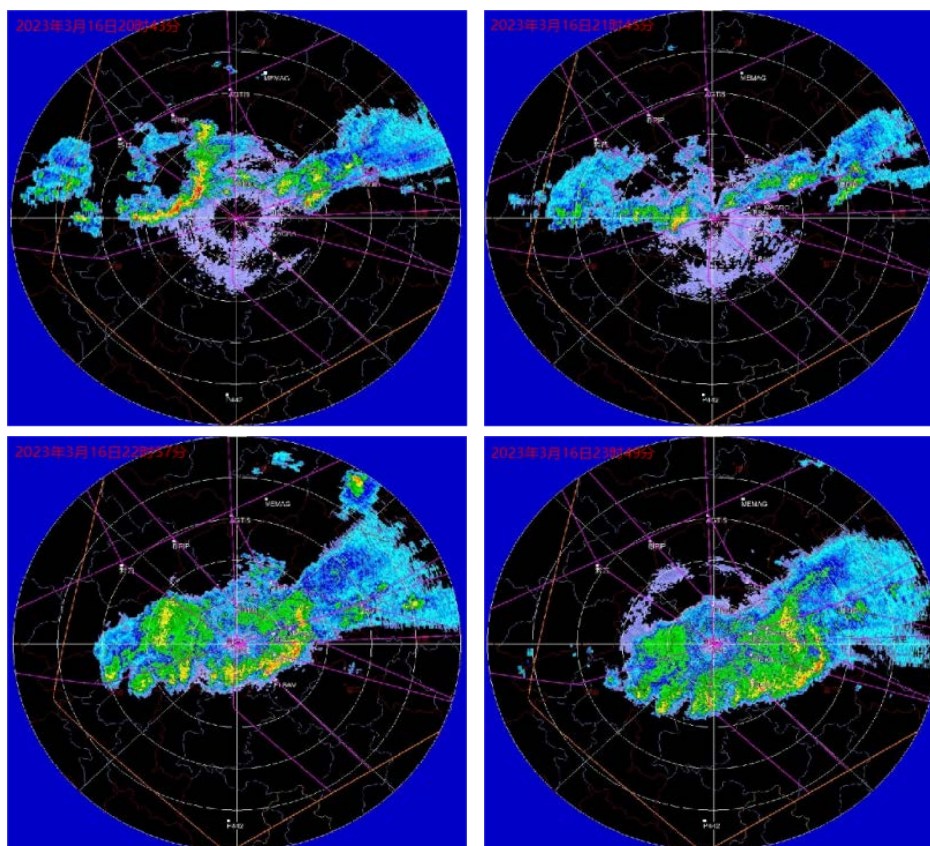


Figure 3. Schematic diagram of radar combination reflectivity at Guiyang Airport from 20:43 to 23:49 on March 16, 2023

图 3. 2023 年 3 月 16 日 20:43~23:49 贵阳机场雷达组合反射率示意图

3.2. MCS 识别过程

首先对葵花八号静止卫星原始数据进行处理，本文采用葵花八号静止气象卫星的红外辐射亮温资料作为数据，主要对 IR7 通道(10.5 μm ~12.5 μm)的数据进行处理并绘制出灰度图，数据格式为 AWX。将数据矩阵转化为图像后对图像进行预处理，由于均值滤波与中值滤波当模板矩阵选取过大，图像边缘会变得更模糊，而采用 3*3 模板得到的图像边缘较为清晰，在本节中将采用 3*3 平滑模板对卫星云图进行降噪处理，对图像二值化及边缘检测后得出实验结果。

贵阳机场位于贵州省中部，海拔高度为 1139 米，坐标为(106°48'E, 26°32'N)，贵州地区的经度范围为东经 103°36'~109°35'，纬度范围为 24°37'~29°13'。

识别结果

通过对葵花八号静止气象卫星云图的目视分析，确定了 2023 年 3 月 16 日贵阳机场附近存在一次 MCS 过程，利用上述方法，选用 2023 年 3 月 16 日的 21 时 00 分~23 时 30 分的卫星数据进行 MCS 自动识别，时间间隔为 30 分钟，识别结果如下图所示：

从以上六时间段内的 MCS 识别图中发现相比原始的卫星云图，计算机自动识别出来的图像非常的清晰，而气象人员若通过肉眼去对 MCS 云团进行识别，在时间上花费较多，并且存在一定的误差性。因此，通过计算机结合 MCS 识别判据对不符合 MCS 标准的云团进行剔除，很大程度上增加了识别率，为气象预报也提供了很好的参考资料，对气象预报员的工作起到了很好的辅助作用。通过对六个不同的时间段

的识别效果进行比对，我们可以看到有的 MCS 正在消散和分裂，有的 MCS 正在生成。而 MCS 过程在 Himawari-8 卫星云图上呈现一片较大的云团，持续时间较长，云顶温度较低，反射率较高。

综合本次样例的分析结果，利用本文所采用的 MCS 识别技术的结果与天气雷达监测结果在时间、空间尺度上基本一致。相比在雷达图上，一般我们看到的天气尺度是较小的，而在卫星云图上，我们看到的天气尺度较大，这些较小的天气尺度移动速度快，可以看见对流云团的移动轨迹。根据葵花八号气象卫星提供的数据对红外卫星云图、可见光云图进行绘制，并使用计算机进行自动识别 MCS，得到的图 4，由识别图与天气资料进行对比分析可知，识别出来的贵阳机场出现的中尺度对流系统比较明显，识别效果也比较好，所以根据此方法对 MCS 进行识别是可行的。

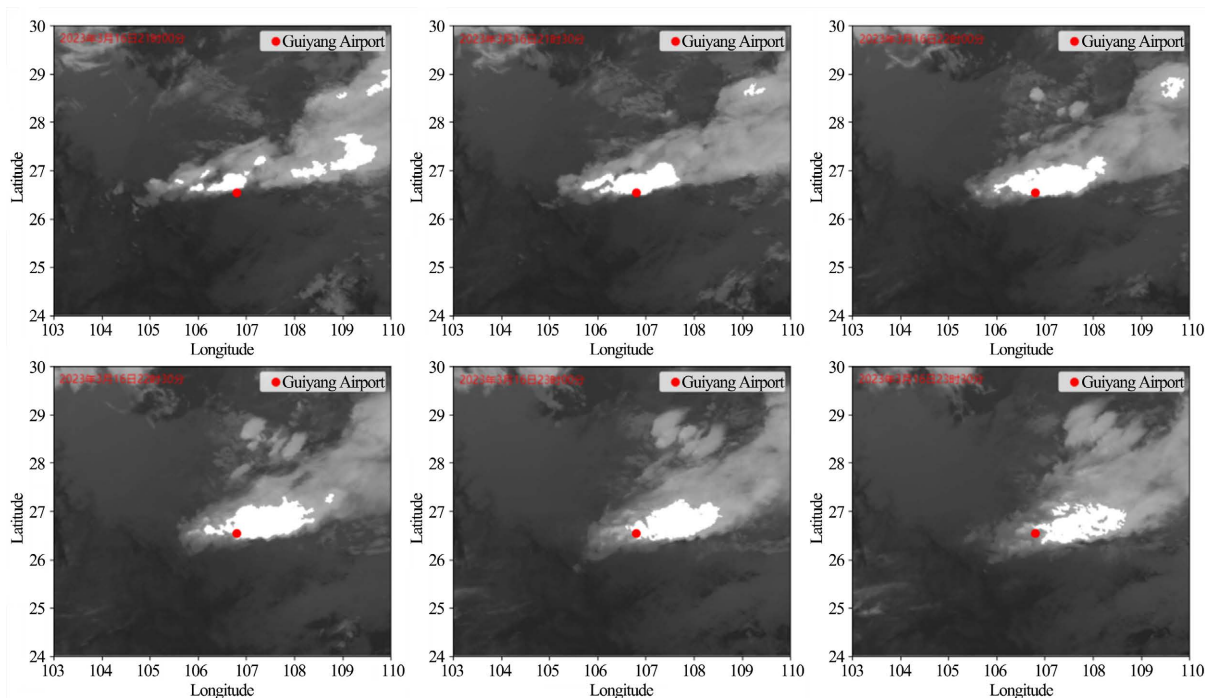


Figure 4. MCS identification results of Guiyang Airport from 21:00 to 23:30 on March 16, 2023

图 4. 2023 年 3 月 16 日 21:00~23:30 贵阳机场 MCS 识别结果图

4. 结论

本文对贵阳机场 2023 年 3 月 16 日的一次 MCS 过程识别分析，将雷达、卫星、机场报文数据结合，通过参照国内学者对 Maddox 所定义的 MCC 做出改进后得到的 MCS 识别判据为标准，根据葵花八号静止气象卫星提供的亮温数据资料，初步地研究了基于静止气象卫星的 MCS 识别方法，利用 python 去实现对卫星云图上的 MCS 的识别。研究结果表明：

1) MCS 过程在卫星云图上呈现为一片较大的云团，持续时间较长，云顶温度较低，反射率较高。

2) 该方法相比于常规的单方面数据分析，卫星资料在临近预报中可以很好的检测到雷暴云团的发生和发展，且分辨率更高、更新频率更快，可以有效地监控中小尺度雷暴天气的发生和发展，以保证航班运行的安全，提高机场、终端区的运行效率。

3) 由于人工识别 MCS 也存在很大的误差，对流云周围的卷云系会影响人工识别对流云，人工识别和处理对流云边界时也会对对流云边界造成一定的影响，所以采用计算机自动识别 MCS 不仅可以增强识别率还可以对气象工作人员的工作起到很好的辅助作用。

参考文献

- [1] Maddox, R.A. (1980) Mesoscale Convective Complexes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **61**, 1374-1387. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1980\)061<1374:MCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1980)061<1374:MCC>2.0.CO;2)
- [2] 费增坪, 王洪庆, 张焱, 等. 基于静止卫星红外云图的 MCS 自动识别与追踪[J]. 应用气象学报, 2011(1): 117-124.
- [3] 李玉兰, 王倩熔, 郑新江, 等. 我国西南—华南地区中尺度对流复合体(Mcc)的研究[J]. 大气科学, 1989, 13(4): 417-422.
- [4] 白洁, 王洪庆, 陶祖钰. GMS 卫星红外云图云迹风的反演[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(1): 85-92.
- [5] 黄勇, 刘慧娟, 翟菁, 等. 基于多阈值的 FY2E 对流云识别方法[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(6): 915-922.
- [6] 马瑞阳, 郑栋, 姚雯, 等. 雷暴云特征数据集及我国雷暴活动特征[J]. 应用气象学报, 2021, 32(3): 12. <https://doi.org/10.11898/1001-7313.20210308>
- [7] 项续康, 江吉喜. 我国南方地区的中尺度对流复合体[J]. 应用气象学报, 1995(1): 9-17.
- [8] 马禹, 王旭. 中国及其邻近地区中尺度对流系统的普查和时空分布特征[J]. 自然科学进展: 国家重点实验室通讯, 1997, 7(6): 701-706.
- [9] 黄勇, 刘慧娟, 翟菁, 等. 一种基于多阈值的 FY2E 对流云识别方法[C]//中国气象学会. 第 30 届中国气象学会年会论文集. 2013: 1-6.
- [10] 宋人杰, 刘超, 王保军. 一种自适应的 Canny 边缘检测算法[J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2018, 38(3): 5. <https://doi.org/10.14132/j.cnki.1673-5439.2018.03.011>