

徐双柱, 吴涛, 张萍萍, 等. 2015. 风云静止与极轨卫星产品在湖北暴雨监测和预报方法中的应用研究. 气象, 41(9): 1159-1165.

风云静止与极轨卫星产品在湖北暴雨监测 和预报方法中的应用研究^{*1}

徐双柱^{1,2} 吴涛² 张萍萍² 王继竹² 董良鹏²

1 武汉暴雨研究所, 武汉 430074

2 武汉中心气象台, 武汉 430074

提 要: 根据 2010—2014 年风云 2 号(FY-2)和风云 3 号(FY-3)气象卫星资料, 结合雷达资料、常规观测资料和数值预报产品等, 利用多阈值法、面积重叠法进行了湖北省暴雨云团的识别跟踪方法研究; 利用配料法进行了湖北省 6 h 暴雨短时预报方法研究。建立了以网页形式的风云系列卫星资料的暴雨监测预报业务系统, 定量监测和预报暴雨的发生、发展。2014 年应用检验结果表明, 该系统对于湖北省暴雨的监测和预报有指导作用。

关键词: 风云静止与极轨卫星, 暴雨, 监测, 预报

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.09.014

Research on Fengyun Stationary and Polar-Orbiting Satellite Data in Monitoring and Forecasting Method of Torrential Rain in Hubei

XU Shuangzhu^{1,2} WU Tao² ZHANG Pingping² WANG Jizhu² DONG Liangpeng²

1 Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074

2 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

Abstract: Using the 2010—2014 FY-2 and FY-3 meteorological satellite data and radar data, conventional observations and numerical forecasting products as well as multi-threshold method, and area overlap method, the cloud identification tracking method for Hubei rainstorm is studied. Besides short-term forecasting method for Hubei 6 h rainstorm is studied by using batching method. Wuhan Central Meteorological Observatory has established a torrential rain monitoring and forecasting system in the form of web page. Forecasters can quantitatively monitor and forecast the occurrence and development of torrential rains by the system. The application and test in 2014 results show that this system plays a guide role in monitoring and forecasting torrential rains in Hubei Province.

Key words: Fengyun stationary and polar-orbiting satellite, torrential rain, monitoring, forecasting

引 言

暴雨、强对流等灾害性天气是由中尺度对流系统(Mesoscale Convective System, MCS)造成的。

长江流域是中国著名的暴雨多发地。每年因暴雨洪涝灾害所造成的经济损失非常巨大。如 1998 年因暴雨洪涝灾害所造成的经济损失达到 2550.9 亿元, 占当年全国全部自然灾害损失比例的 85%。

卫星遥感资料具有观测范围广、时空分辨率高

* 中国气象局风云三号气象卫星应用系统二期工程应用示范项目、中国南方暴雨预报专家团队和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306016)共同资助

2014 年 6 月 3 日收稿; 2014 年 9 月 3 日收修定稿

第一作者: 徐双柱, 主要从事天气预报和预报技术研究. Email: xsz3180@163.com

等特点,目前是暴雨、强对流等灾害性天气监测预警预报的主要数据源。Maddox(1980)根据卫星观测提出了对流生命史概念,将对流划分为生成、发展、成熟和消亡阶段。费增坪等(2008)给出了一种基于图像处理和时间序列分析技术的 MCS 自动识别、存储、追踪和时间序列特征统计方法。刘健等(2007)利用多种卫星资料综合分析中尺度暴雨云团特征。方翔等(2008)利用 NOAA 卫星 AMSU-B 水汽通道亮温差实现了对深对流云和冲顶对流云的定量判识。研究表明,利用气象卫星资料对暴雨进行观测,能够有效地监测和预报暴雨的形成、移动以及持续时间等(许健民等,2006;巴德等,1998;陈国春等,2011;王瑾等,2009;郑永光等,2008;江吉喜等,2002;刘本正等,1998;段旭等,2004;项续康等,1995;陈小华等,2013;杜倩等,2013)。随着风云系列气象卫星的发射,我国的气象卫星遥感技术得到了快速的发展,自主卫星产品也日益丰富(杨军等,2009)。武汉中心气象台 2007—2009 年通过 FY-3A 星的开发与应用项目,2009—2012 年通过公益性行业(气象)科研专项“卫星云图解译技术研究”,2013 年以来通过 FY-3 气象卫星应用系统二期工程应用示范项目等持续性研究工作,卫星资料的应用水平得到明显的提升。本文介绍武汉中心气象台利用风云静止与极轨卫星产品在湖北暴雨监测和预报方法中的应用研究。

1 资 料

(1) 2010—2013 年 6—10 月,2014 年 5—7 月 FY-3A/B 微波湿度计、红外辐射计、中分辨率光谱成像仪各通道产品;

(2) 2010—2013 年 6—10 月,2014 年 5—7 月 FY-2C/D/E 卫星资料;

(3) 2010—2013 年 6—10 月,2014 年 5—7 月地面、高空常规观测资料;

(4) 2010—2013 年 6—10 月,2014 年 5—7 月湖北省逐小时降水资料;

(5) 2010—2013 年 6—10 月,2014 年 5—7 月欧洲数值预报产品、T639 数值预报产品、日本数值预报产品。

2 暴雨云团识别跟踪

关于降水云团的识别,国内研究有许多不同的

方法。李森等(2010)通过设定指数和通道亮温差阈值,使用“逆向搜索法”获取雷暴云团的轮廓来识别强对流云团。朱亚平等(2009)利用微波遥感和光学遥感两种手段,采用多光谱聚类方法,较好地识别出强对流云团。师春香等(2001)利用神经网络技术对 AVHRR 云图进行云分类、识别。FY-2 云图资料具有时间分辨率高特点,可以高密度连续监视。与 FY-2 相比,FY-3 云图资料具有空间分辨率高(达到 250 m),探测要素多,如增加了红外大气垂直探测和微波辐射探测等。在处理如何使用 FY-3 和 FY-2 云图资料,采用了同一时间两种云图对比,建立 FY-3 云图资料订正 FY-2 云图资料关系。武汉中心气象台采用的暴雨云团识别跟踪方法是基于 FY-2 参考 FY-3 云图资料识别对流云团轮廓,结合地面雨量和雷达资料计算云团特征量,识别跟踪云团生命史状态。

2.1 多阈值法识别云团

在卫星云图中,中尺度对流系统 MCS(以下简称云团)(王微等,2001;卓鸿等,2012)表现为云顶亮温值低于一定阈值的连续区域,并且该区域面积应满足一定阈值。云团识别就是识别出该区域,通常以轮廓码描述其外形,其中 Freeman 链码表最为常见。Freeman 链码是用曲线起始点的坐标和边界点方向代码来描述曲线或边界的方法(图 1)。为了便于查找云团内部任意位置的亮温值,使用线段码表示整个区域,该线段码可由 Freeman 链码转换而来。轮廓码主要用来计算云团的几何参数(如椭圆参数)及保存外形,线段码主要用来计算与云团亮温有关的物理参数,如平均亮温、最低亮温等。

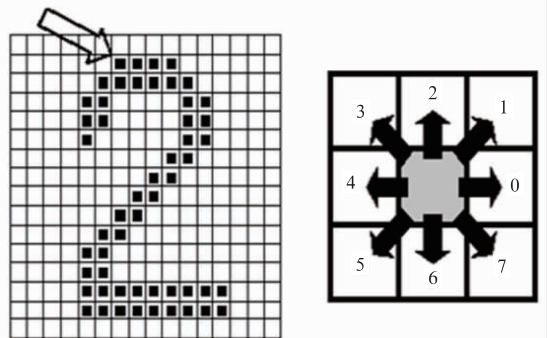


图 1 Freeman 链码示意图

(轮廓码为:000077665555556600000000644

4444442221111112234445652211)

Fig. 1 Freeman chain code

(code: 0000776655555566000000006444444

442221111112234445652211)

相对于单阈值法识别云团技术,多阈值法具有多组阈值,每组阈值由亮温和面积组成,分别对应于识别云团的温度和面积要求。阈值级别越高,其亮温越低、面积值越小。在初次识别的云团区域内,先用高级别亮温阈值识别出强中心,然后从强中心区域开始扩展云团范围,一直扩展至亮温满足下一级别亮温阈值的区域或至另一个子云团的边界,对该区域进行面积检测后进入下一级别阈值的云团区域识别。最后,由中心区域扩展后的区域即为子云团的范围(图 2)。

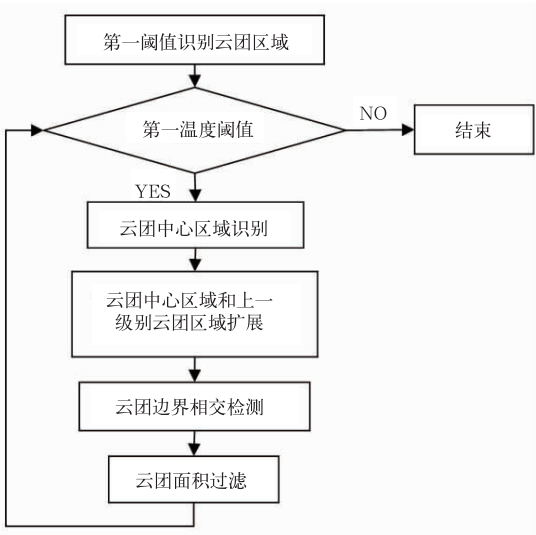


图 2 多阈值法识别云团算法流程图
Fig. 2 Multi-thresholding algorithm process of cloud identification

2.2 云团跟踪

云团跟踪实现对不同时次云图上的同一云团进行关联。武汉中心气象台采用了目前较为成熟的面积重叠法识别相邻时次同一云团,即相邻时次两个云团的重叠程度越大,则为同一云团的可能性就越高,同一云团所对应 R_i 值最大。

$$R_i = \frac{M_i(t+1) \cap N(t)}{M_i(t+1)}, M_i(t+1)、N(t) \text{ 分别表示 } t+1、t \text{ 时刻的云团范围。}$$

云团演变过程中经常会发生合并(或分裂)现象,造成正常一对一的匹配不具有唯一性,对其进行识别也能为预报员提供更多的信息。采用面积重叠程度识别这一现象(图 3),如一个云团同时与几个云团有面积重叠,且重叠程度必须满足一定条件,则认为云团出现合并、分裂,重叠程度最大的云团为上

一个云团的延续,不需重新分配云团编号,其余云团为消亡(或新生)云团。因此,根据云团识别跟踪结果,云团可划分为初始、演变、消亡、合并、分裂共 5 种状态。通过对云团进行跟踪,可获取云团发生发展过程中的历史演变信息,如移动路径、云顶亮温变化等,为云团生命史分析及短时临近预报提供依据。

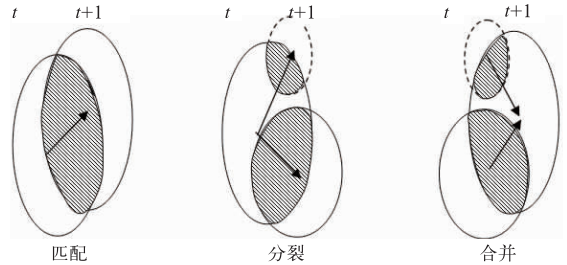


图 3 云团跟踪示意图
(阴影区为云团重叠区域)

Fig. 3 Schematic cloud tracking
(Shaded area is for areas with overlapped clouds)

3 暴雨短时预报

武汉中心气象台 6 h 降水定义为:30.0~49.9 mm 为暴雨,50.0~99.9 mm 为大暴雨,100.0 mm 以上为特大暴雨。

利用 FY-3 提供的相应时次高分辨率微波湿度计和微波成像仪产品、FY-2 多通道探测资料、卫星气象中心下发的相关指导产品,以及日本、欧洲中心细网格模式预报相应预报时段的物理量产品,结合地面及高空常规观测资料,对 2010—2013 年 5—9 月 0~6 h 暴雨个例云图资料进行分析,用“配料法”思想建立 0~6 h 暴雨短时预报模型。每日提供 4 次湖北省 6 h 暴雨短时预报(起报时段为北京时 02、08、14 和 20 时)。

3.1 暴雨配料法

“配料法”是由 Doswell 于 1996 年提出的对于强降水的一种新的预报方法。一般一场强降水(P)的发生主要与上升速度、水汽供应量以及降水持续时间(D)有关,即

$$P = E \overline{q\omega} D$$

式中, P 是降水量, q 是比湿, ω 是上升速度, E 是比例系数, D 是降水持续时间。

研究表明,长江中下游地区暴雨的主要制造者是深的湿对流系统。暴雨系统的发生发展主要受三

种基本物理成分的影响:水汽、上升强迫和不稳定。采用诊断分析的方法,从FY-2、FY-3卫星产品以及日本、欧洲、T639数值预报产品中,选取与水汽、上升强迫和不稳定三种基本物理成分相关的最佳“配料”因子,制定合适的“配料”综合指数方程,并通过统计分析的方法,确定6h短时暴雨预报的“配料”综合指数阈值(龙利民等,2010)(图4)。

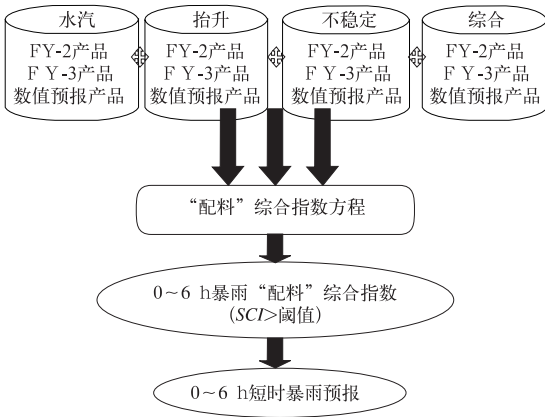


图4 利用卫星资料制作暴雨短时预报流程

Fig. 4 Procedure of rainstorm nowcasting based on satellite data

3.2 降水综合指数 SCI

表示0~6h降水的“配料”综合指数命名为SCI(satellite-based comprehensive index)。通过对2010—2013年5—9月0~6h暴雨个例统计分析得到SCI方程如下:

$$SCI = (qqq * (insta + lift1 + lift2 + lift3) / 100 + zonghe0) / 4$$

其中:

$$qqq = (rh_850_ec_max - (hs5 - 273.15)) / (1 + (t - t_d)_850_T639_min) \quad (\text{水汽含量, 饱和度})$$

$$insta = aki_T639_max - mpv2_850_T639_min + FY-2_grad + FY-2_convec \quad (\text{不稳定})$$

$$FY-2_convec = 250 - (FY-2_tbb) \quad (FY-2_tbb < 250 \text{ k}, \text{否则 } FY-2_convec = 0, \text{表示深对流})$$

$$lift1 = vor_850_ec_max + div_200_ec_max \quad (\text{大尺度抬升})$$

$$lift2 = vor_850_T639_max - div_850_T639_min \quad (\text{中尺度抬升})$$

$$lift3 = -qxy_850_T639_min \quad (\text{垂直运动})$$

$$zonghe0 = 2 \times rain_japan_6h + rain_T639_6h$$

$$- (hs1 + meris5) / 2 \quad (\text{降水产品})$$

其中,max(min)表示6h最大值(最小值);rain_6h表示6h的降水总和;rh_850_ec表示850hPa欧洲数值预报相对湿度;aki_T639表示T639K指数;mpv2表示湿位涡斜压项;vor、div表示涡度、散度;qxy表示q矢量散度;rain_japan_6h表示日本数值预报模式6h雨量;FY-2_grad表示FY-2亮温梯度;hs1和hs5分别表示FY-3微波湿度计第一和第五通道亮温值;meris5表示FY-3中分辨率光谱成像仪第五通道亮温。

通过对2010—2013年5—9月0~6h暴雨个例统计分析,当降水综合指数SCI>45时,未来0~6h将有暴雨(≥ 30 mm)出现。

4 应用实例

2014年6月1日受500hPa河套低槽东移影响在湖北东部形成暴雨云团,造成湖北东部出现较大范围的短时强降水。武汉中心气象台研制的卫星资料监测和预报暴雨的业务系统准确识别跟踪这次暴雨云团的形成和发展(图5),并做出了准确的6h暴雨短时预报。

2014年6月1日05时,鄂东北有单个对流云团发展,如图5白色闭合线,随后云顶亮温降低,亮温低值区范围扩大,成熟时外形呈圆形,边缘较平滑,东移南压过程中云团后向发展明显,呈现指状特征。卫星资料监测和预报暴雨的业务系统正确识别该暴雨云团范围以及跟踪暴雨云团移动路径,如图5中的白色粗线为云团中心移动轨迹,结合湖北多部雷达拼图资料记录下其云团演变的特征(表1)。该云团平均云顶亮温为203.8K、最大亮温梯度为3.43K·km⁻¹、平均亮温梯度为0.75K·km⁻¹、亮温低值区(≤ 223 K亮温)面积为29368km²、最大雷达组合反射率因子为46.25dBz、回波顶高为14km、最大累积液态含水量为10kg·m⁻²。

进一步分析所监测到的暴雨云团特征量的演变(表1),发现该云团最低云顶亮温主要位于203K附近,这与2010—2013年历史资料统计结果较一致,即长江流域暴雨云团最低云顶亮温90%出现在203K附近,最大亮温梯度大于历史资料统计结果(2010—2013年历史统计值为2K·km⁻¹),亮温低值区(≤ 223 K亮温)面积也大于历史资料统计结果(2010—2013年历史统计值为10000km²),表明该

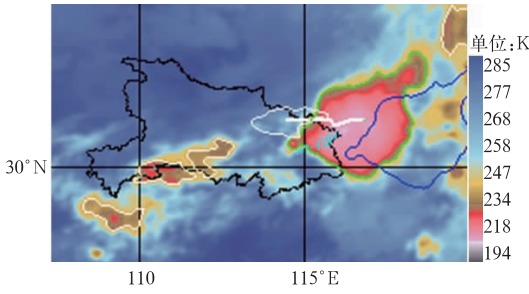


图 5 2014 年 6 月 1 日 08 时红外云图
和 05—08 时暴雨云团识别跟踪

(白色粗线为云团移动路径,白(绿)色闭合线分别为 05 和 08 时识别的云团轮廓,蓝色闭合线为云团 3 h 预报轮廓,蓝色点表示降水 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 站点)

Fig. 5 Infrared imagery at 08:00 BT and heavy rain clouds identification and tracking during 05:00—08:00 BT 1 June 2014

(White thick line is cloud moving path, white (green) closed line is cloud outline at 05:00 BT (08:00 BT), blue closed line is 3 h cloud outline forecast, blue dot indicates precipitation $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ sites)

云团发展非常旺盛,实况降水资料表明该云团造成降水强度超过 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,最大达到 $59.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。暴雨云团最低云顶亮温演变经历了先降后升的过程,面积演变趋势为先增大后缩小,尤其在暴雨云团消亡时其面积快速下降。

2014 年 6 月 1 日 08—14 时,湖北东南部出现短时暴雨(图 6a)。从 09 时 FY-2 红外云图上看鄂东南地区无低亮温云团生成(图 6b),而从 FY-3 微波湿度计 13 通道数据(图 6c)可以看出鄂东南出现明显的低值中心,表明该地区湿层深厚,欧洲数值预报降水预报产品预报鄂东南只有 10~15 mm 的降水(图略),卫星资料监测和预报暴雨的业务系统 6 h 降水客观预报产品预报出鄂东南将出现 30 mm 以上的短时暴雨天气(图 6d),预报与实况基本吻合,同时也可以看出, FY-2、FY-3 卫星资料与数值预报产品有相互补充的作用,配料法能够将 FY-2、FY-3 卫

表 1 2014 年 6 月 1 日湖北省暴雨云团识别跟踪特征量

Table 1 Rainstorm cloud cluster track characteristics in Hubei on 1 June 2014

时间	最低亮温 /K	最大亮温梯度 /K · km ⁻¹	平均亮温梯度 /K · km ⁻¹	≤223 K 亮温面积/km ²	最大组合反射率因子/dBz	最大回波顶高/km	最大累积液态含水量/kg · m ⁻²
05:00	211.6	3.80	1.00	7600.00	45.00	14	5
06:00	202.4	3.40	0.80	19725.00	50.00	14	20
07:00	200.6	3.40	0.70	36475.00	45.00	14	10
08:00	200.6	3.10	0.50	53675.00	45.00	14	5
平均	203.8	3.43	0.75	29368.75	46.25	14	10

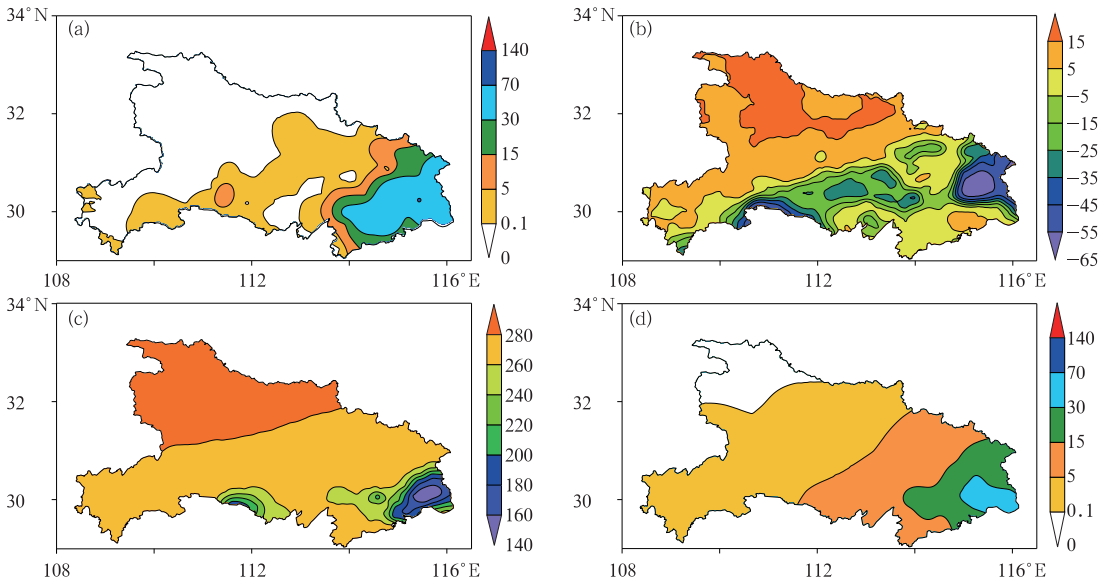


图 6 2014 年 6 月 1 日(a)08:00—14:00 降水实况(单位: mm), (b)09:00 红外云图(单位: °C), (c)09:00 FY-3 微波湿度计产品(单位: K), (d)6 h(08:00—14:00)短时预报产品(单位: mm)

Fig. 6 (a) 08:00—14:00 precipitation (unit: mm), (b) 09:00 infrared cloud (unit: °C), (c) 09:00 FY-3 microwave hygrometer product (unit: K), (d) 6 h (08:00—14:00) nowcasting product (unit: mm) 1 June 2014

星资料和数值预报产品有机结合,实现了预报与实际较为吻合的客观预报产品。

5 应用与检验

卫星资料监测和预报暴雨的业务系统实现了风云卫星资料的收集、处理及对各类监测预报产品的集成显示功能,为预报员提供可视化使用界面。所有产品均在统一的WEB页面下进行显示,该页面与预报业务应用平台有效结合,实现各类数据资料实时显示、分析(图7)。2014年5月开始在湖北省地级市气象台推广应用,取得了良好的效果。根据2014年5—7月针对影响湖北省的暴雨云团的监测跟踪和短时预报的客观评估,暴雨云团监测准确率达到61.3%,6 h暴雨短时预报准确率达到25.3%(表2)。客观评估结果表明,卫星资料监测和预报暴雨的业务系统对于湖北暴雨的监测和预报有一定的指导作用。

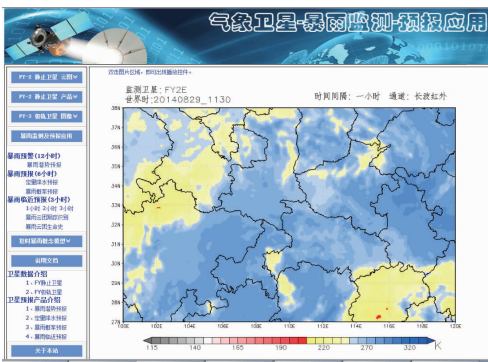


图7 气象卫星对暴雨监测和预报应用界面

Fig.7 Application interface of rainstorm monitoring and forecasting by meteorological satellite

表2 2014年5—7月湖北省暴雨云团监测和6 h暴雨短时预报TS评分

Table 2 TS scores of rainstorm cloud cluster monitoring and 6 h rainstorm forecast in Hubei from May to July 2014

类型	TS 评分 / %	空测(报)	漏测(报)
		率/ %	率/ %
暴雨云团监测	61.3	24.5	14.2
6 h暴雨短时预报	25.3	41.3	33.4

附:暴雨云团监测评分方法:逐小时红外云图所识别出的暴雨云团,与湖北省77个自动站逐小时雨量对比,在暴雨云团所在区域中只要出现1 h最大

降水量30 mm以上1站以上为正确1次;如果在暴雨云团中未出现1 h最大降水量30 mm以上的站点为空测一次;如果在湖北省自动站已经出现1 h最大降水量30 mm以上1站以上,而没有相应的暴雨云团(识别)为漏测1次,统计湖北省暴雨云团监测正确、空测、漏测次数。

6 h暴雨短时预报TS评分方法:湖北省77站6 h暴雨短时预报预报产品,与湖北省77个自动站6 h累加雨量对比,任何一个站出现6 h累加雨量 ≥ 30 mm为一个样本,统计湖北省正确、空报、漏报站数。

6 结论

FY-2静止气象卫星和FY-3极轨气象卫星是两个不同系列的气象卫星,两者具有较强的互补性。武汉中心气象台利用风云系列卫星资料开展湖北暴雨监测和预报方法应用研究,得到以下结果。

(1) 利用时间分辨率高的FY-2云图资料,结合空间分辨率高的FY-3云图资料,采用了多阈值法识别暴雨云团和面积重叠法追踪暴雨云团,能够有效地进行湖北暴雨云团的识别跟踪。

(2) 根据暴雨“配料法”原理,统计FY-2和FY-3卫星资料的参数在湖北暴雨的作用,结合数值预报产品,建立了湖北暴雨预报方程,可以进行湖北暴雨6 h落区预报。

(3) 武汉中心气象台研究开发的卫星资料监测和预报暴雨的业务系统已经在湖北省地级市气象台推广应用,2014年客观评估结果表明,该系统对于湖北暴雨的监测和预报有指导作用。

参考文献

- 巴德MJ,福布斯GS,格兰特JR,等.1998.卫星与雷达图像在天气预报中的应用.卢乃猛,等译.北京:科学出版社,308-309.
- 陈国春,郑永光,肖天贵.2011.我国暖季深对流云分布与日变化特征分析.气象,37(1):75-84.
- 陈小华,段旭.2013.基于卫星和雷达资料估测滇中地区降水量方法研究.气象,39(2):203-209.
- 杜倩,覃丹宇,张鹏.2013.一次西南低涡造成华南暴雨过程的FY-2卫星观测分析.气象,39(7):821-831.
- 段旭,张秀年,许美玲.2004.云南及其周边地区中尺度对流系统时空分布特征.气象学报,62(2):243-250.
- 方翔,邱红,曹志强,等.2008.应用AMSU-B微波资料识别强对流云区的研究.气象,34(3):22-29.
- 费增坪,王洪庆,张焱,等.2011.基于静止卫星红外云图的MCS自

- 动识别与追踪. 应用气象学报, 22(1):115-122.
- 江吉喜, 范梅珠. 2002. 青藏高原夏季 TBB 场与水汽分布关系的初步研究. 高原气象, 21(1):20-24.
- 李森, 刘健文, 刘玉玲. 2010. 基于 FY2D 静止卫星云图的强对流云团识别. 气象水文海洋仪器, 27(2):72-78.
- 刘健, 张文建, 朱元竟, 等. 2007. 中尺度强暴雨云团云特征的多种卫星资料综合分析. 应用气象学报, 18(2):158-164.
- 刘正本, 赵守春, 孙献革. 1998. 卫星云图在短时降水预报中的应用. 气象, 24(2):31-33.
- 龙利民, 张萍萍, 张宁. 2010. 2008-07-22 襄樊特大暴雨 FY-3A 微波资料分析. 大气科学学报, 33(5):569-575.
- 师春香, 吴蓉璋, 项续康. 2001. 多阈值和神经网络卫星云图云系自动分割试验. 应用气象学报, 12(1):70-78.
- 王瑾, 柯宗建, 江吉喜. 2009. 2008 年西北太平洋热带气旋活动特征分析. 气象, 35(12):44-50.
- 王微, 潘益农, 束宇. 2011. 中国东部夏季中尺度对流系统以及中尺度对流涡旋的特征. 南京大学学报(自然科学版), 47(6):692-702.
- 项续康, 江吉喜. 1995. 我国南方地区的中尺度对流复合体. 应用气象学报, 6(2):9-17.
- 许健民, 张其松. 2006. 卫星风推导和应用综述. 应用气象学报, 17(5):575-582.
- 杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 2009. 中国新一代极轨气象卫星——风云三号. 气象学报, 67(4):501-509.
- 郑永光, 陈炯, 朱佩君. 2008. 中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征. 科学通报, 53(4):471-481.
- 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. 应用气象学报, 20(4):428-436.
- 卓鸿, 赵平, 李春虎, 等. 2012. 夏季黄河下游地区中尺度对流系统的气候特征分布. 大气科学, 36(6):1112-1122.
- Maddox R A. 1980. Mesoscale convective complexes. Bull Amer Meteor Soc, 61:1374-1387.