

# 湖北省卫星云图短时暴雨概率预报方法及应用

王继竹 郭英莲 徐双柱 韦惠红

(湖北省武汉中心气象台, 武汉 430074)

**摘要** 利用实时红外卫星云图资料,在湖北省分区域短时暴雨云图特征分析的基础上,通过提取与短时暴雨相关的云图特征参数,结合 NCEP 数值预报综合判断,建立湖北省分区域 0~6 h 卫星云图短时暴雨概率预报方法,并已投入实时业务预报应用。结果表明:所选云图特征参数能够较好的体现不同区域间短时暴雨云团特征,概率预报计算方法合理,对于短时暴雨的预报起到一定的指导作用。从预报检验看,预报方法还应在减小空报和漏报方面继续改进。

**关键词** 卫星云图 分区域 短时暴雨 概率预报

## 引言

暴雨及其产生的洪涝灾害是我国主要的自然灾害之一,短时暴雨具有持续时间短、灾害性强等特点,一直以来是气象科研的重点和预报的难点。卫星在短时暴雨监测和研究方面具有得天独厚的优势,高分辨率的静止卫星图像可以用作识别大气中正在发生的动力和热力过程的有效指示。随着静止卫星探测能力的不断增强,基于卫星云图的定量降水估测、强对流云团识别、人工影响天气、短时强对流天气预报等技术研究得到了较大的发展<sup>[1-7]</sup>。本文利用静止卫星红外云图资料,在湖北省短时暴雨历史个例研究的基础上,结合数值预报形势场及物理量场预报,建立湖北省短时暴雨概率预报方法,旨在提高卫星云图在短时暴雨预报方面的应用能力。

湖北省在卫星云图解译技术方面也有研究,韦惠红<sup>[8]</sup>等根据湖北省不同季节暴雨发生的天气形势,结合卫星云图上典型暴雨中尺度对流云团的演变特征,建立湖北省短时暴雨预报的 5 种卫星云图模型。本文将作为此研究的延伸,将模型中的要素进行量化,作为判断短时暴雨发生的指标,通过湖北省各个分区暴雨发生 1~2 h 云团特征参数的变化

来计算未来短时(0~6 h)暴雨发生的概率。同时,为了减小卫星云图在短时暴雨概率预报的空报,引入数值预报对短时暴雨的综合判别,最终得到湖北省(分区)短时暴雨概率预报结果。

## 1 资料介绍

### 1.1 实况资料

文中使用的实况资料包括:地面常规观测资料及湖北省 78 个地面观测站 6 h 降雨资料。卫星云图数据为中国气象局实时下发 FY-2D 卫星分区图(SEC)数据,选择红外通道(IR1)等经纬度投影图像数据,数据格式为 AWX,空间分辨率为 5 km,时间分辨率为 30 min。该数据采用二进制存储方式,由定标数据块规定图像灰度值与探测物理量(亮温)间的关系,使用定标数据块按照查找表的方式即可获得像素点的亮温值。

6 h 降雨资料主要用于短时暴雨历史个例筛选和预报检验;卫星云图资料主要用于提取卫星云图特征参数。卫星云图特征参数计算选用两个连续时刻的云图数据,采用后一时刻  $t+1$  与前一时刻  $t$  云图数据对比计算的方法。由于云图数据接收有延迟(一般 1 h 左右),所以实时概率预报中采取延后启

动的方式,预报时段为起报时间后的 0~6 h。以每日 08:00 概率预报为例,08:00 概率预报启动时间为每日 09:00—10:00,云图数据选择 08:00 和前一时刻(07:30 或者 07:00),预报时间段为 08:00—14:00,其他时刻概率预报以此类推。

### 1.2 数值预报资料

数值预报产品选用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction)每日 08:00、20:00(北京时)起报的 6 h 间隔的全球数

值预报模式,空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ 。武汉中心气象台现已实时将其转化成 MICAPS 格式的格点数据资料,并根据预报要素计算得到大量的物理量要素场,为本文提供重要的基础数据。

历史个例综合判别式中选用 NCEP 数值预报的 0 场资料,即 08:00 和 20:00 实际有效时间的格点资料。短时暴雨的综合判别选用与预报时间最接近起报时刻的 NCEP 数值预报场。

表 1 短时暴雨综合判别中数值预报与概率预报时段对应关系(北京时)

数值预报		预报时段			
起报时刻	预报时效	02:00—07:00	08:00—13:00	14:00—19:00	20:00—01:00(次日)
08:00	12~18 h				
	18~24 h				
20:00	12~18 h				
	18~24 h				

## 2 研究区域及短时暴雨标准

### 2.1 研究区域

湖北省地处长江中游,西、北、东 3 面环山,中南部低平开阔,由于境内地形结构复杂,导致湖北省气候特征差异较大,降水分布也呈现不同的特点。蔡道明等<sup>[9]</sup>利用湖北省 21 个气象站降水资料对湖北省年降水的空间分布和周期特征进行了研究,将湖北省降水分为鄂西北、鄂北、鄂东北、鄂东、鄂中南、鄂西南 6 个敏感区。本文借鉴其区域划分原则并结合预报业务实际,将湖北省降水区域划分为鄂西北、鄂西南、江汉平原、鄂东北、鄂东南 5 个降水区。

### 2.2 短时暴雨标准

湖北省短时暴雨预警标准中定义了 2 种短时暴雨:1 h 大于 30 mm 和 3 h 大于 50 mm。考虑本文未使用加密雨量站数据,短时暴雨标准为:降水区域内 6 h(以每日 02:00、08:00、14:00、20:00 作为计时结点)出现 2 站或者 2 站以上雨量大于等于 30 mm,定义该区域一次短时暴雨过程。

短时暴雨历史样本资料选取 2011 年湖北省 5—10 月 29 次短时暴雨过程,其中鄂西北 5 次、鄂东北 7 次、鄂西南 7 次、江汉平原 3 次、鄂东南 7 次。

## 3 短时暴雨概率预报方法

短时暴雨概率预报是通过计算满足短时暴雨卫星云图特征参数个数占特征参数总数的比例,以此表征起报时刻后 0~6 h 内暴雨发生概率,每个降水区域的云图特征参数阈值通过历史个例分析而来。目前选取的云图特征参数有 16 个,分别来自每个预报区域的上游系统区(I 区)和暴雨落区,即目标研究区(II 区)。

$$P = \left( \frac{\sum_{i=1,m} p_{meet}}{\sum_{i=1,n} p_{all}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

其中  $P$  为卫星云图特征参数计算的短时暴雨概率, $p_{meet}$  为满足该区域短时暴雨卫星云图参数阈值的参数总数, $p_{all}$  为短时暴雨卫星云图特征参数总数。

短时暴雨概率预报的思路是分析研究短时暴雨发生前红外云图的变化特征,判断特征参数与统计学阈值的关系,计算卫星云图概率预报结果;结合 NCEP 数值预报场分析,为卫星云图暴雨预报提供形势场判断依据,最终形成湖北省分区域 0~6 h 卫星云图短时暴雨概率预报产品。概率预报结果输出原则:如果 NCEP 综合判断结果为 1,即有短时暴雨发生,则  $P' = P$ ( $P$ :卫星云图概率预报结果);反之,如果 NCEP 综合判断结果为 0,即无短时暴雨发生,则  $P' = P/2$ 。预报产品每日逐时输出结果,其中

02:00、08:00、14:00、20:00 与对应时段地面 6 h 降水实况进行预报准确率评比,产品结果文件采用 MICAPS 格式存储,便于业务调阅使用。

### 3.1 云图特征参数

(1)云顶亮温最低值。云团的云顶亮温是能够反映云团降水强弱的最为重要的云图特征量,暴雨云团的亮温都比较低,一般亮温越低表示云顶越高<sup>[10]</sup>。

(2)云顶最低亮温 1 h 变化。充分利用红外云图资料时间分辨率高的优势,监视云团的变化趋势。研究表明,随着云顶亮温的降低,降水强度也随之增大。

(3)云顶亮温小于 240 K 面积。历史个例显示,云顶亮温小于 240 K 对于湖北省短时暴雨具有较强的指示意义。本文中的面积采用云图资料的像素点个数来表征。

(4)云顶亮温小于 240 K 面积 1 h 变化。云图上低亮温区域的面积变化作为云团发展与消亡的标志,可以作为降雨云团的发展变化判断标志。

(5)云顶亮温小于 220 K 面积。历史个例显示,云顶亮温小于 220 K 发生短时暴雨的概率非常高。

(6)云顶亮温小于 220 K 面积 1 h 变化。

(7)云顶亮温梯度。除云顶亮温之外,另一个与降水强度密切的云团特征量是云顶亮温梯度,它体现了云团内部垂直方向上的风向切变<sup>[11]</sup>。

(8)最大云顶亮温梯度 1 h 变化。

### 3.2 提取云图特征参数阈值

分析湖北省各个分区暴雨云团形成源地、持续时间和移动路径、生命史演变等发生发展规律和特征,表明:暴雨发生前,暴雨云团(局地生成暴雨云团

除外)从源地到暴雨发生地其强度、面积等有不同变化的特征,因而在提取云图特征参数时为每个分区划定一个上游影响系统区,即关键区 I,以此来表征暴雨发生前云团的变化特征;关键区 II 为暴雨落区,即目标预报区域,该区域内云图特征的变化对暴雨的发展有很强的指示意义。图 1 为短时暴雨概率预报云团关键区示意图。

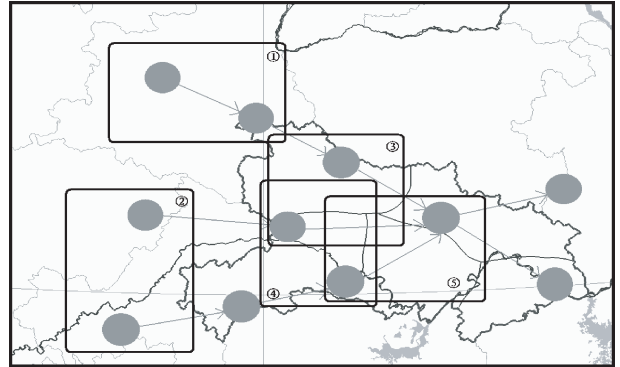


图 1 短时暴雨概率预报云团关键区示意图  
(实心圆圈表征强降雨云团,①、②、③、④、⑤分别为鄂西北、鄂西南、鄂东北、江汉平原、鄂东南关键区 I)

选取暴雨发生前两个连续时刻的卫星云图数据计算云图特征参数,同时,根据各个参数不同的意义,每个参数预报阈值的提取采取不同的计算方法:“变化”类参数计算方法选用求和,求和的方法可以反映过去一段时间变化的总体趋势及量级;最大梯度选用平均值,求平均的方法可以反映最大梯度的平均大小,研究表明<sup>[11]</sup>云团降水最强的区域并不是出现在云顶亮温梯度最大的地方,而是出现在云顶亮温梯度区移动方向上。表 2 以鄂西南 I 区为例说明阈值的确定方法。

表 2 鄂西南云图特征参数阈值及计算方法

序号	最低亮温/K	亮温变化/K	240K 面积 /像素点	240K 面积变化 /像素点	220K 面积 /像素点	220K 面积变化 /像素点	最大亮温 梯度	亮温梯度 变化
1	180	-8	373	-13	359	9	-62	3
2	185	6	321	-49	318	-38	-78	-6
3	185	0	293	-24	293	-21	-62	16
4	180	-6	285	-9	251	-43	-64	-2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
计算方法	最小值	求和	最小值	求和	最小值	求和	平均值	求和
计算结果	183	-8	285	-82	251	-93	-67	4
阈值	≤180	≤8	≥280	≤-80	≥250	≤-90	≤60	≥4

湖北省地形复杂,不同分区见气候特征差异较大,降水分布呈现不同的特点等因素,不同区域的云图特征参数存在较大差异(阈值表略),说明选取的各参数能够较好的体现不同区域间暴雨云团特征。

分别选取2011年5个分区内一次暴雨过程云图参数,根据3节中方法计算短时暴雨发生的概率,用于检验概率预报方法的预报效果。结果表明:概率预报结果均大于等于60%,说明,云图参数的选择对于短时概率预报是较合理的,可以用于业务预报。

### 3.3 提取预报因子

湖北省短时暴雨预报的5种卫星云图模型中<sup>[8]</sup>对影响短时暴雨各个关键系统及物理量都有详细描述,这里主要是通过程序计算的方法将各个预报因子经过提取、量化、统计计算,给出短时暴雨发生与否的综合判断结果,旨在减小卫星云图短时暴雨概率预报的空报率。

提取预报因子首先确定关键区,预报因子关键区的确定,主要根据不同因子分布规律来确定。以鄂西北为例(图2),主要的影响系统主要有500 hPa槽线、中低层低涡切变及西南急流等,将历史个例影响系统绘制到平面图上即可确定出2个系统分部集中区域,即关键区①、关键区②;同理,将各物理量高值中心标注在平面图上即可确定关键区③。其他区域关键区的确定遵照此法(图略)。

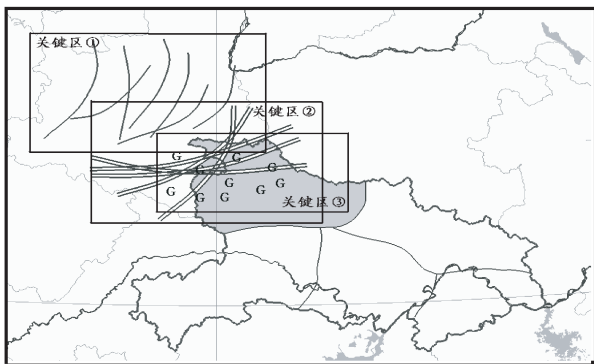


图2 鄂西北短时暴雨关键区示意图

(关键区①内线条为槽线;关键区②内线条为槽线、切变线;  
关键区③G为物理量高值中心)

关键区内预报因子分为两类:系统要素(槽线、切变线)以0,1量化,即有则赋值1,无则赋值0;物理量要素(700 hPa急流、850 hPa急流、700 hPa假相当位温、850 hPa假相当位温、700 hPa比湿、850

hPa比湿、强天气威胁指数、K指数)根据等级划分,以4,3,2,1,0量化,具体程序识别方法:

(1)系统要素(槽线、切变线)。读取NCEP预报场风场数据,通过判断给定范围(关键区①、关键区②)内格点风场的风向来判断槽线和切变线的存在。槽线,即存在东西向相邻格点西北风与西南风(或西风)切变,如果东西向相邻5~10个格点存在切变,而且南北向格点要相邻(保证风场的连续性)即记为槽线,存在赋值为1,不存为0;冷/暖切变线,即存在南北向相邻格点西北风与西南风或西风切变(偏南风 and 偏北风、偏东风的切变),存在赋值为1,不存为0。

(2)物理量要素(急流、假相当位温、比湿、强天气威胁指数、K指数)。读取NCEP预报场风场、物理量数据,西南急流通过判断给定范围(关键区③)内风速的大小,按照不同等级进行量化处理:风速大于16 m/s,赋值为4、风速12~15 m/s,赋值为3、风速8~11 m/s,赋值为2、4~7 m/s,赋值为1、小于4 m/s,赋值为0;其余物理量(假相当位温、比湿、强天气威胁指数、K指数)则通过判断预报落区物理量高值中心与关键区③物理量高值中心的关系来量化,例如,物理量Q在关键区中高值中心值为A,预报落区内高值中心值为B,设 $C=A-B$ 。若 $C \leq 3$ ,则说明预报落区位于关键区内,赋值3;如果 $4 < C < 6$ ,则说明预报落区位于关键区外围,赋值2;如果 $7 < C < 10$ ,则赋值1;如果 $C \geq 11$ ,则说明预报落区远离关键区,赋值0;如果物理量 $Q \leq Q_0$ ( $Q_0$ 为该物理量所应满足的最小值),则直接赋值0。

### 3.4 建立短时暴雨综合判别式

选取2011年29次短时暴雨个例作为预报方程的样本资料,提取各预报因子,建立短时暴雨综合判别式:

$$F_i = a_{i1}X_{i1} + a_{i2}X_{i2} + \dots + a_{im}X_{im} \quad (2)$$

其中, $F_i$ 为预报对象值, $X_{i1}$ 为预报因子量化值, $a_{im}$ 为各因子权重系数, $a_m = X_m / \sum_{i=1,m} X_m$ , $i$ 为个例序号(表3)。

将某一地区短时暴雨历史个例中各个预报因子量带入公式2,计算权重系数 $a_m$ ,即可得到该地区短时暴雨预报方程(略),回代预报因子后得到 $F_i$ ( $i=1, m$ ),取预报对象最小值,即为该地区预报临界值 $F_{TLV}$ ,即 $F_{TLV} = \min(F_i), i=1, m$ 。在实时预报时,

表3 短时暴雨综合判别式预报因子

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
①区 500 hPa 槽线	①区 700 hPa 切变线	①区 850 hPa 切变线	②区 700 hPa 切变线	②区 700 hPa 急流	②区 850 hPa 切变线
$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$
②区 850 hPa 急流	③区 700 hPa 假相当位温	③区 850 hPa 假相当位温	③区 850 hPa 比湿	③区强天气 指数	③区 K 指数

注:①~③区指图1中定义的暴雨关键区。

当预报值  $F_x \geq F_{TLV}$ , 则报该分区 0~6 h 有暴雨发生;反之,  $F_x \leq F_{TLV}$ , 则报该地区 0~6 h 无暴雨发生。

#### 4 短时暴雨概率预报检验

##### 4.1 检验标准和方法

短时暴雨标准:降水区域内 6 h 出现 2 站或者 2 站以上雨量大于等于 30 mm, 雨量以每日 02:00、08:00、14:00、20:00 地面实况 6 h 雨量为准。

概率预报评估对象:每日 02:00、08:00、14:00、20:00 概率预报,其余时刻预报不参与预报评分。

概率预报评估标准:预报落区内,6 h 雨量实况大于等于 30 mm 的站数大于等于 2 站,并且概率预报大于等于 60%,记为一次正确;实况未出现 2 站以上雨量大于等于 30 mm,且概率预报大于等于 60%,记为一次空报;实况出现 2 站以上雨量大于等于 30 mm,并且概率预报小于 60%,记为一次漏报。TS 评分计算方法:  $N_{\text{正确}} / (N_{\text{正确}} + N_{\text{空报}} + N_{\text{漏报}})$ 。 $N_{\text{正确}}$  表示暴雨预报成功次数; $N_{\text{空报}}$  表示暴雨预报空报次数; $N_{\text{漏报}}$  表示暴雨预报漏报次数。

卫星云图暴雨短时概率预报业务于 2012 年 5 月正式投入业务运行,期间程序运行稳定,数据输出正常,2012 年暴雨集中期 7—8 月预报正确率 13.73%,分区域评分如表 4。

表4 2012年7—8月短时暴雨概率预报分区检验 %

	TS 评分	空报率	漏报率
鄂西北	18.75	62.5	18.75
鄂东北	5.88	47.06	47.06
鄂西南	23.08	38.46	38.46
江汉平原	4.25	85.11	10.64
鄂东南	16.67	50.0	33.33

##### 4.2 短时暴雨两个例预报效果

2012 年 8 月 20 日,湖北省出现局部暴雨过程,图 3 是 2012 年 8 月 20 日 08:00 至 21 日 08:00 湖北省 24 h 降雨量图,图中可以看出,此次强降水落区位于鄂西北、鄂西南、江汉平原、鄂东北北部,分布极不均匀,强降雨主要出现在 20 日 20:00 至 21 日 02:00。从逐小时红外云图演变(图略)分析,降雨最强的 6 h 内,鄂东南的云团经历了由强到弱,最后消亡的过程,而鄂西北则经历了由弱到强,逐渐加强的过程。卫星云图短时暴雨概率逐小时预报(略)对系统的发展有很好的预报效果,其中 20 日 20:00 预报(鄂西北 94%,鄂东北 69%,鄂西南 75%,江汉平原 63%,鄂东南 38%)概率分布基本反映了此次过程暴雨强度分布,鄂西北地区暴雨概率 94%,为 5 个分区中最大,其他区域的概率则都较小,说明云图参数在暴雨发生前即表现为明显的短时暴雨特征。

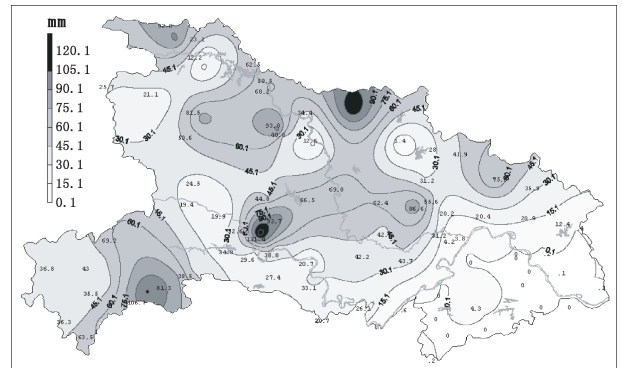


图3 2012年8月20日08:00至21日08:00雨量实况

#### 5 结论与讨论

本文采用静止卫星云图资料与数值预报(NCEP)资料相结合的方法,尝试用于制作短时暴雨概率预报,取得了一些初步的成果,从 2012 年预报效果检验看,方法还有待继续改进,分析原因可能

有以下几点:

(1)卫星云图特征参数的提取历史个例样本较少,2011年个例无法完全体现所有短时暴雨云图特征。

(2)卫星云图特征参数的提取原则只是借鉴了前人研究的成果,缺乏湖北省短时暴雨的统计特征分析,下一步将开展红外云顶亮温与湖北省各区域降水关系研究。

(3)短时暴雨过程的起止时间与预报时间有差别,人为划定的预报时间可能存在不合理之处,这也是造成概率预报偏差的原因。

(4)短时暴雨综合判别的准确率有待提高,对所选预报因子将通过大量个例研究不断丰富,如反应整层水汽辐合条件的水汽通量散度等物理量。

目前,此项工作只是初步的尝试,需要进一步对预报方法进行修正,以提高预报准确率。

## 参考文献

[1] 杨引明,姚祖庆. 中国东部地区卫星估计降水系统及其应用

[J]. 气象科技,2005,25(2):149-157.

[2] 洪毅,袁德辉. 基于卫星云参数的短时降水动态估测方法[J]. 气象科技,2011,39(3):266-271.

[3] 李森,刘健文. 基于FY2D静止卫星云图的强对流云图识别[J]. 气象水文海洋仪器,2010,27(2):72-78.

[4] 盛日锋,龚佃利. FY-2/D卫星反演的云特征参数与地面降水的相关分析[J]. 气象科技,2010,38(增刊):69-72.

[5] 白洁,王洪庆,陶祖钰. 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,1997,13(2):158-167.

[6] 陈见,高安宁. 广西暴雨卫星云图与热带流场变化综合预报方法[J]. 气象科技,2006,34(2):138-142.

[7] 林祥明,林长城,张长安,等. 福建“98·6”中尺度强降水红外云图特征量统计分析[J]. 热带气象学报,2002,18(3):253-261.

[8] 韦惠红,赵玉春. 湖北省卫星云图短时暴雨概念模型研究[J]. 暴雨灾害,2010,29(1):14-37.

[9] 蔡道明,鄢铁平,廖炜,等. 湖北省1957—2009年降水时空变化特征分析[J]. 水土保持研究,2010,17(6):237-241.

[10] 徐双柱,吴涛. 风云3号气象卫星资料在暴雨预报中的应用[J]. 灾害学,2011,26(3):97-102.

[11] 胡波,杜惠良,肖云. 用云团强中心附近最大亮温梯度区判别强降水[J]. 气象科技,2005,33(5):401-403.

# Application of Satellite Data in Probabilistic Forecasting for Short-Time Rainstorms in Hubei Province

Wang Jizhu Guo Yinglian Xu Shuangzhu Wei Huihong

(Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074)

**Abstract:** Based on the characteristic analysis of satellite images during short-time rainstorm in Hubei Province, by using the real-time satellite data and collecting the characteristic parameters of the images related to the short-time rainstorm, a probabilistic short-time rainstorm forecasting method is presented, which is regionalized with a lead time of 0 to 6 hour, in combination with NCEP numerical forecasting products. The results show that the selected characteristic parameters can reflect the different characteristics of short-time rainstorms, and the calculating method is reasonable and plays a certain guidance role in short-time rainstorm forecasting, but it should be improved in the aspects of false and miss forecasting rates.

**Key words:** satellite image, short-time rainstorm, probabilistic forecasting