

文章编号: 1000-2022(2004) 01-0106-07

黑龙江省产生冰雹的卫星云图特征

张晰莹¹, 方丽娟², 景学义², 许秀红²

(1. 黑龙江省人工影响天气中心, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 哈尔滨市气象台, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 为对区域性降雹过程的卫星云图特征进行分析, 选取了 1995—1998 年产生冰雹的卫星云图共 20 例, 进行了逐例分型、分类。对冰雹云的空间尺度、时间尺度、云顶、云体形状、温度梯度等进行了详细的分析和探讨, 提出一个黑龙江地区产生冰雹的云图概念模型和冰雹的预报程序。

关键词: 卫星云图; 概念模型; 预报流程; 冰雹

中图分类号: P405 **文献标识码:** A

冰雹是预报难度很大的一种灾害性天气, 由于尺度小、生命史短, 常规的气象资料很难揭示其演变过程。尤其是黑龙江省地域辽阔, 观测站点稀少, 对中小尺度灾害性天气系统无法监测。冰雹对农业生产造成的损失是巨大的, 对人民的生产安全有着严重的威胁, 所以研究冰雹的发生机制, 提高其预报准确率和延长预报时效, 一直是黑龙江省深入研究的重要课题。

目前的常规探空站网, 无论是空间分布还是观测的时间频次都不足以揭露产生冰雹的中小尺度系统的发生、发展和演变。因此地球静止卫星是对监测、研究冰雹等中小尺度天气系统最有效的工具之一。在国内采用卫星云图资料系统地研究降雹过程的工作还不是很多, 特别是利用卫星资料进行冰雹的预报工作更少。

为对区域性降雹过程的卫星云图特征进行分析, 选取了 1995—1998 年 20 次产生冰雹的卫星云图进行了逐例分型。对冰雹云的空间尺度、时间尺度、云体形状、云顶亮度温度及亮温梯度等进行了详细的分析和探讨, 为预报冰雹的发生发展提供参考依据, 同时为人工消雹提供有用的依据。

1 分析及资料处理

通过对 20 次冰雹过程的分析, 发现产生黑龙江地区冰雹的主要天气系统是冷涡和冷锋。从云型上分析大致可分为三种类型: 第一类是冷涡天气系统下的涡旋云型; 第二类是冷锋天气系统下的冷锋云带和不规则零散分布的对流单体云型; 第三类是冷锋后部冷气团内的不稳定造成的孤立的中小尺度云团。

本文利用卫星云图资料估计产生冰雹天气的方法是云指数法和云生命史法^[1-2]。

云指数法是利用产生强对流的中尺度或中间尺度云团的云型特征及其在可见光和红外云图上的对比分析, 得到不同特征云系与降水强度的统计关系, 从而得到使用卫星云图预测冰雹产生的方法。

云生命史法是根据对流云团在红外云图上以云顶的温度和反照率所表现出来的对流旺盛程度, 以及对流随时间的演变来预测冰雹的产生。

根据上述方法, 将 4 a 中 20 例产生冰雹的卫星云图按下面 6 个特征分析: (1) 影响黑龙江省的天气系统; (2) 冰雹云在天气系统中的位置; (3) 冰雹云体的形状; (4) 冰雹云的面积(黑龙江省 1 个经距大约是 110 km); (5) 云顶亮温 T_{BB} ; (6) T_{BB} 梯度。

表 1 中给出了冰雹相对降水云系的位置、冰雹的云型、降雹云团的尺度、降雹云团的云顶亮度温度 T_{BB} 和 T_{BB} 梯度。在统计中资料的选取标准为: 全省当日有 3 个以上站点出现冰雹, 定为冰雹过程。然后收集整理了上述过程的静止卫星资料, 进行逐例反查, 并从天气图上分析其影响天气系统。下面对黑龙江地区的降雹云系特征作分析。

表 1 冰雹云卫星云图特征分析
Table 1 Characters of satellite cloud pictures of hail clouds

日期	影响系统	冰雹发生的部位	云体形状	云体面积 (经距 × 纬距)	T_{BB} /	T_{BB} 梯度
1995-05-17	冷涡	涡旋云系南部	椭圆有长轴、云砧	2° × 4°	- 54	12
1995-05-20	冷涡	涡旋云系南部	圆形	0. 2° × 0. 2°	- 30	22
1995-05-22	冷涡	涡旋云系中心	圆形	0. 5° × 0. 4°	- 48	15
1995-05-25	冷涡	涡旋云系东南部	准圆形	0. 1° × 0. 1°	- 39	20
1995-05-26	冷涡	涡旋云系东北部	椭圆、圆形	0. 3° × 0. 3°	- 54	12
1995-06-18	冷涡	涡旋云系东部	椭圆、圆形	2° × 0. 5°	- 47	12
1995-06-05	冷锋	冷锋云系中段	椭圆有长轴、云砧	2° × 1°	- 48	14
1995-06-26	冷涡	涡旋云系西南部	准圆形	2° × 3°	- 48	13
1996-06-11		冷锋云系上	椭圆有长轴、云砧	5° × 2°	- 54	12
1996-06-24	冷锋	冷锋云系上	椭圆	1. 2° × 1. 5°	- 39	12
1996-06-26	冷涡	涡旋云系南部	准圆形	2° × 4° 4° × 5°	- 60, - 49 - 70	10, 14 8
1996-09-06	冷锋	冷锋云系后部新生	准圆形	5° × 5°	- 60	11
1996-09-08	冷锋	冷锋云系上	椭圆有长轴	2° × 4°	- 60, - 50	10, 15
1997-05-29	冷涡	涡旋云系东部	准圆形	0. 1° × 0. 2°	- 39	20
1997-05-30	冷涡	涡旋云系西北部 涡旋云系东北部	准圆形	1° × 0. 5°	- 54 - 39	12 21
1997-06-08	冷涡	涡旋云系东部	准圆形	0. 2° × 0. 3°	- 22	22
1997-06-09	冷涡	涡旋云系中心	椭圆	1° × 2°	- 39	20
1997-09-09	冷涡	涡旋云系南部	准圆形	1° × 0. 5°	- 48	15
1998-06-05	冷涡	涡旋云系南部	圆形	1° × 1°	- 63	7
1998-06-08	冷锋	涡旋云系后部	准圆形	2° × 2°	- 48	15

2 冰雹云的初步分析

2.1 东北冷涡是产生冰雹的重要天气系统

产生冰雹的强对流云团是在一定的大尺度背景天气系统内发生、发展和演变的,黑龙江地区的冰雹绝大部分都与冷涡相伴随,占总数的 90 %。20 个例中只有 1996-09-06 和 1996-09-08 两例是没有冷涡的单独冷锋或副冷锋产生的冰雹。冷性涡旋云系的出现标志着高空冷涡的强盛。高空冷平流加之低层暖湿空气的活跃,以及地面受太阳辐射加热,使大气层结极不稳定,促进了强雷暴云的发展,导致冰雹的产生。

2.2 冰雹云的形状及尺度

从表 1 对卫星资料的统计发现,黑龙江地区的冰雹云型主要有椭圆形和准圆形两种,只有少数为圆形。冰雹云尺度一般不很大,有的仅为 10~20 km 的小尺度云团,只有少数达到中尺度云团(如 1996-06-26 冷锋云系接近 500 km)。黑龙江地区冰雹云的共同特点是初生时云体边界光滑,色调白亮;成熟时冰雹云上风边界十分整齐光滑,下风边界有卷云砧,表现为具有长轴椭圆形和顶部出现卷云砧,表明其处于强的风速垂直切变环境中。

2.3 T_{BB} 与 T_{BB} 梯度

从表 1 中可以看出,亮度温度 T_{BB} 是指示对流强弱的参考指标, T_{BB} 越低,云顶越高,对流活动越强,产生降雹的可能性越大。但是,在黑龙江省当云顶亮温 ≤ -22 时,就会有冰雹发生。事实上,只有 5 次冰雹过程的云顶亮温 $T_{BB} \leq -60$ 。分析发现冰雹产生时间并不是 T_{BB} 出现最低值时,统计发现有 75 % 的冰雹产生在 T_{BB} 降低时(降雹云团处于发展阶段)。如图 1 所示,1995-05-17T 16—20 的个例中,在主冷锋后部的副冷锋云带上, C 处由零散、不规则的小块对流单体发展成为具有明显长轴的冰雹云时,齐齐哈尔北部产生大范围的降雹。其余 25 % 产生在 T_{BB} 升高时(降雹云团处于衰弱阶段),也就是降雹发生于云顶发生显著改变时,如 1995-06-26T 15,云团已具有明显长轴和云砧,16 时开始在鹤岗的北部的部分县市出现了冰雹(图略)。

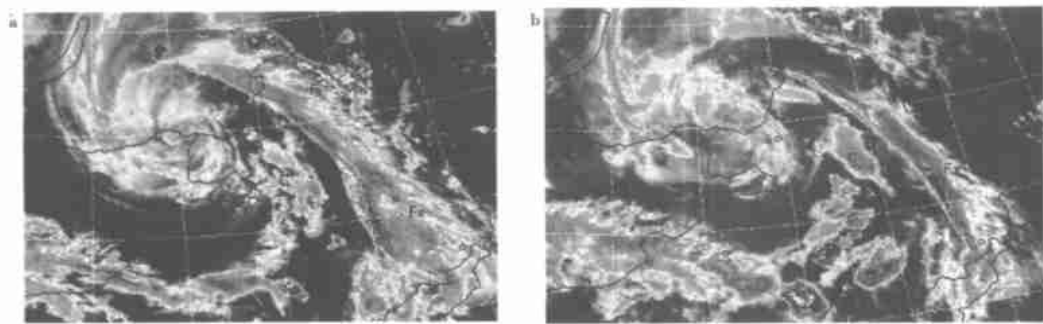


图 1 黑龙江省冷涡冰雹实例

a. GMS 1995-05-17T 16 IR; b. GMS 1995-05-17T 20 IR

Fig. 1 Images of hail clouds in a cold-vortex

a. GMS 1995-05-17T 16 IR; b. GMS 1995-05-17T 20 IR

从以上分析可见,相对于云顶亮温 T_{BB} ,云顶温度梯度是表征降雹的更重要指标。云顶温度梯度大,也说明了云顶的纹理丰富,起伏剧烈。采用 3×3 的像素宽度来计算云顶温度梯度,即

$$G = \{ [T_{i+1,j} - T_{i-1,j}]^2 + [T_{i,j+1} - T_{i,j-1}]^2 \}^{1/2}.$$

式中 T 为温度, i, j 为像素坐标。对于降雹云团分析发现, 在降雹云团区内的 T_{BB} 梯度同云顶亮温有较好的负相关关系, 也就是云顶亮温较低的区域云顶亮温梯度较大, 而云顶亮温较高的区域云顶亮温梯度较小。可以判定冷涡或冷锋云系中 $T_{BB} < -26$ 且 $G > 10$ 的区域是冰雹云团的易发区。

3 降雹的天气型和云型特征

黑龙江省产生冰雹的对流云团, 相应于 3 类天气尺度云系有两种主要的天气系统与之配合。第 1 类是东北冷涡; 第 2 类是冷锋 (包括锢囚锋和副冷锋)。由于云系和天气系统的配置和稳定性不同, 构成了两种不同云型和天气型特征。

3.1 冷涡造成冰雹的天气型和云型特征

3.1.1 天气系统

冷涡的主要特点是降雹前一天 20 时高空冷涡位置比较偏北, 700 hPa 涡中心位于 $115 \sim 130^\circ\text{E}$ 、 $46 \sim 52^\circ\text{N}$, 并有冷中心或冷槽配合。地面对应为冷锋或低压后部的副冷锋, 在降水过程中, 低空有明显的西南暖湿急流为其提供水汽来源。降雹时, 黑龙江省处在冷涡主槽后部, 高空为西北气流控制, 低空为偏西气流。由于冷涡主槽移过黑龙江省时产生明显降水, 因此降雹的水汽主要来自降水后潮湿地面的水汽蒸发和冷涡自身的潮湿空气。

冷涡造成的降雹, 主要是在中午前后开始, 极个别的也有上午降雹。充足的日照可使低层迅速增温增湿, 大气不稳定性加剧, 同时北方高空干冷空气沿槽后西北气流下滑, 造成高层干冷空气与低层暖湿的层结不稳定。这种不稳定形势的维持, 为对流的发展和冰雹的形成提供了能量来源。当冷涡在黑龙江省维持时, 冷涡后部不断有冷空气随高空槽向黑龙江省侵入, 成为大范围冰雹产生的触发机制。

3.1.2 冷涡的云型和降雹云特征

图 1 是典型的东北冷涡云型, 可以看到在 16 时 (图 1a), F_1 、 F_2 表现为完整的冷锋云带, 在该云带的后部 C 处是杂乱的对流云系, 到 20 时 (图 1b) 冷涡云系发展增强, 冷锋云带 F_1 、 F_2 出现断裂、减弱, 而于 C 处发展成一椭圆形的冰雹云团, 有西北—东南向的长轴, 顶部有云砧, 造成黑龙江省西南部大范围的降雹。

本文由卫星资料和天气资料分析可得到以下几点:

(1) 冷涡系统与涡旋云型相对应。在卫星云图上表现为由几条曲率相近的螺旋云带绕中心旋转的云型。这些螺旋云带呈逆时针方向沿着冷涡外围移动过程中, 加强并发展成强对流云带, 产生冰雹, 大范围冰雹多属此种类型。从分析资料中可见冷涡系统造成的冰雹占总数的 65%, 并且其降雹时间、地点比较集中, 强度较强。

(2) 从云图分析中可以清楚地看到降雹与降水的云系不同。降水云系往往来自西南部或西部, 而降雹往往是在一次明显降水过程结束后, 即与冷涡相联系的系统性锋面云系已移出东北地区进入日本海或日本以东, 该云系北部的螺旋云系受冷涡后部偏北气流影响后逆时针方向移动造成的。说明了冷空气对区域降雹的重要性。

(3) 云系的发展与移动。来自北部的涡旋云系位于 $120 \sim 130^\circ\text{E}$ 、 $40 \sim 50^\circ\text{N}$ 范围内, 该云系在此范围内少动、加强。这说明在此区域内有使它发展的热力和动力条件。一般上午的云图上单体不大, 有的仅为对流泡状甚至看不到, 午后加强, 移动缓慢, 傍晚后云系明显减弱东移。

(4) 降雹云系的结构特征。降雹云系为结构密实的对流单体, 尺度相差较大, 较大的云团有

$5^{\circ} \times 5^{\circ}$ (经距 $\times$ 纬距), 较小的有 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ (经距 $\times$ 纬距), 色调明亮, 边界清晰, 云顶亮度温度在 $-70 \sim -30$, 云体的亮度温度梯度大, 云系的发展很快, 突发性强, 10 时云图上单体不大, 有的仅为对流泡状, 在中午前后已发展加强, 并形成中尺度对流云团。

3. 1. 3 东北冷涡降雹的概念模型

图 2 给出了冷涡降雹过程的概念模型。分析 300 hPa 风场, 发现它对东北冷涡的加强或减弱具有重要的指示意义。过程前 1 天 20 时亚洲的中高纬度地区有一支西风急流, 位于 $40 \sim 50^{\circ} \text{N}$ 之间。在 $105 \sim 120^{\circ} \text{E}$ 之间气流平直, 在 115°E 附近开始向西北伸, 黑龙江省位于脊区, 对应红外云图, 东北冷涡云系的顶部边界与急流轴近似平行。这种对流层上层的辐散加强了低层的上升运动, 促进冰雹云的产生。为了进一步分析冰雹产生的机制, 分析了对流层中低层 500 hPa 到 850 hPa 的 θ_e , 可以看到它们均有一个明显的湿舌。冰雹云团就产生在湿舌的顶部, 也就是 θ_e 最大轴线附近。低空急流对暖湿空气的向北输送起到了重要的作用。它从山东省呈西南—东北方向伸展到黑龙江省, 与降水概念模型相比, 它的位置略偏西偏北。在地面冷锋减弱、逐渐脱离涡旋云系后, 常常出现一条和低空急流轴走向一致的、由一个个对流单体或泡状云团组成的云带, 午后或傍晚对流单体发展成冰雹云。

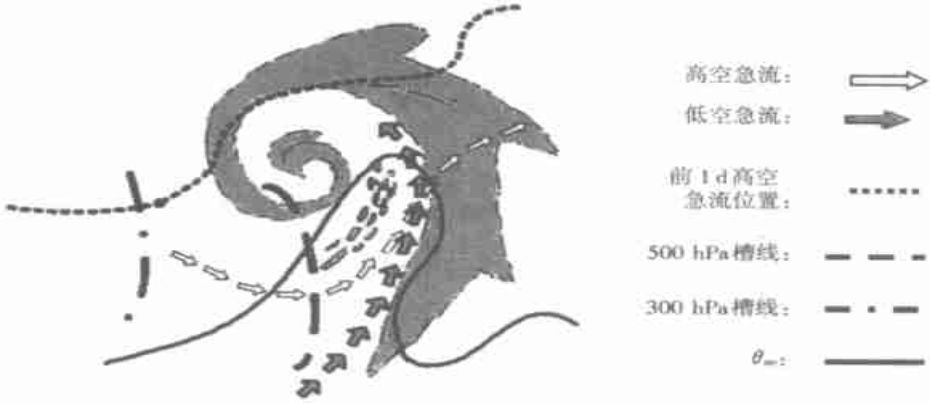


图 2 东北冷涡在黑龙江省降雹的概念模型

Fig. 2 The conceptual model of the Northeast China cold-vortex that produces hails in Heilongjiang Province

3. 2 冷锋造成冰雹的天气型和云型特征

3. 2. 1 天气系统

由冷锋造成冰雹的天气形势特点是高空环流比较平直, 西来系统移动速度较快。低空 850 hPa 在华北至黑龙江省西部有一明显暖脊, 在暖脊后有一高空冷槽, 大气表现为较强的层结不稳定。降雹前 1 天 20 时, 500 hPa 在黑龙江省西部有一弱槽, 同时 700 hPa 和 850 hPa 均有一弱槽相对应, 地面有冷锋或气旋。由于高空环流比较平直, 槽后有新的冷空气补充, 使高空槽移速加快。与此同时, 在对流层低层, 由于暖空气势力较强, 当锋面移近暖区时, 速度减慢, 使锋面由低层至高层呈垂直分布, 甚至出现较明显的前倾。当高空槽移近时, 对流层上层正涡度平流加大, 辐散加强, 同时由于锋面的猛烈抬升, 在地面冷锋区形成强烈上升运动。

另外, 副冷锋产生降雹。在主冷锋后部, 由低压中心分析出一条副冷锋, 由于在冷锋后部的冷区中层结不稳定, 尤其是在午后极易产生暴雨和冰雹天气。

3. 2. 2 云型特征

卫星云图上,冷锋云系位于 120~130 E、40~55 N 范围内,云表现为非常清楚的冷锋云带,云系日变化十分明显。上午云带呈不连续的带状,随着时间的推移,到中午前后迅速加强,云带中的对流单体十分明显,而且随冷锋移动,对流单体合并增强,在云团的白亮处产生冰雹。这种类型的降雹均出现在冷锋区或锋后的冷区中,在副冷锋和锢囚锋中也有降雹。在统计的资料中各有一例,比较少见。在早晨卫星云图上(图 3a), F_1 、 F_2 为黑龙江省东部地区的冷锋云带,云带后界十分整齐,且呈气旋性弯曲,锋后为大片晴空区,表明冷空气较强。在冷锋云带 F_1 、 F_2 的后部附近为较松散的对流云系;到午后(图 3b)有对流降雹云团 C 生成,表现为密实的积雨云团。

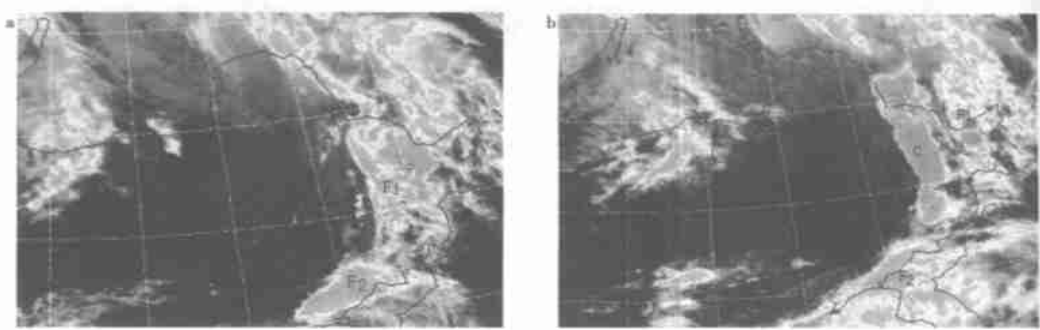


图 3 黑龙江省冷锋冰雹卫星云图特征

a. GMS 1996-09-08T 10 IR; b. GMS 1996-09-08T 15 IR

Fig. 3 Images of cold-front type hails in Heilongjiang Province

a. GMS 1996-09-08T 10 IR; b. GMS 1996-09-08T 15 IR

4 对流云团的降雹估计及误警分析

用卫星云图估计降水量和降雹是一项具有发展前景的工作,国内外的卫星气象工作者一直从事这项工作。黑龙江省属高纬地区,强对流的研究相对低纬地区少得多。以 1995—1998 年共 20 例产生冰雹的资料(主要是静止卫星云图)为依据,研究了对流云发展和演变、云系特征、系统的日变化、云区的范围、强度、云顶高度等与强对流云产生冰雹的关系,得到是否产生冰雹的短时预报方法(图 4)。现归纳为以下几个步骤: 1) 是否有冷涡、冷锋天气系统云系移入黑龙江省; 2) 移入黑龙江省的时间在中午至傍晚前后,极易产生强对流天气; 3) 利用每小时一次的红外、可见光、水汽三种云图资料跟踪监视云系的发展演变,同时天气雷达进行加密观测; 4) 对强对流云团进行强度估计,分析是否将有冰雹产生; 5) 分析出对流云团的移动速度、云体的垂直高度、云区范围、云团的温度梯度和发展趋势; 6) 最后做出冰雹落区和强度预报。

采用这种冰雹短时预报方法,在 2001—2002 年的实际使用中误警率为 19%,其中漏报率为 4%,空报率为 15%。分析其原因有主要两方面:一是样本较少;二是卫星云图的接收和分析时间间隔为 1 h,而冰雹云生命史时间较短的只有 10 min 多。

参考文献:

[1] 方宗义. 使用卫星和常规气象资料制作降水强度估计和短时预报方法[C]. 长江流域强降水云团的分析预报方法研究课题. 1993.

[2] 陈桂祥, 范惠君, 方宗义. 长江流域北槽南涡暴雨过程中暴雨云团的产生及其短时预报[C]. 长江流域降水云团的分析预报方法研究课题组. 1993.

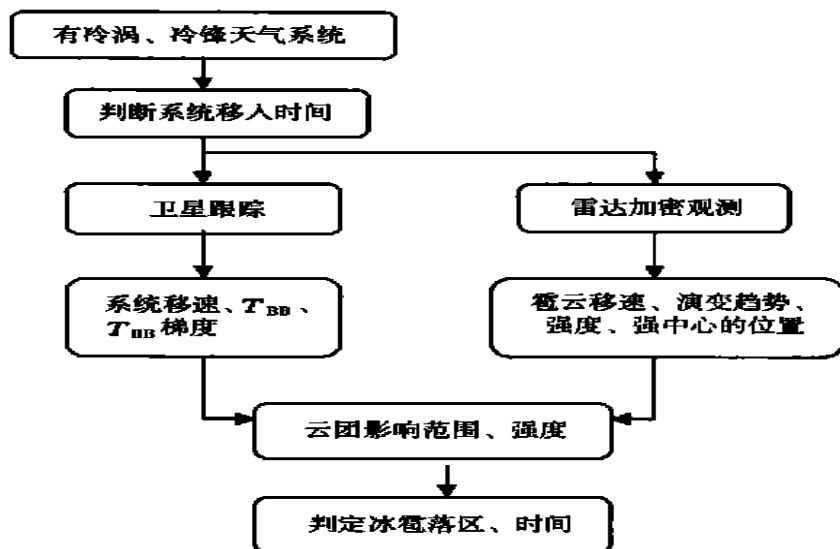


图 4 冰雹短时预报流程

Fig.4 Flow chart of the short range forecast of hails

Characteristics of Satellite Images of Hail Clouds in Heilongjiang Province

ZHANG Xi-ying¹, FANG Li-juan²,
JING Xue-yi², XU Xiu-hong²

(1. Heilongjiang Weather Modification Center, Harbin 150030, China;

2. Harbin Meteorological Observatory, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to analyse the cloud features of regional hail processes, all the satellite images of 20 processes from 1995 to 1998 are typified and classified one by one in this paper. A conceptual model of hail clouds that produces hails in the Heilongjiang area and the procedure for hail forecasting are presented based on the detailed analysis and reserch of spatial scale, time scale, top, shape and temperature gradient of hail clouds.

Key words: satellite image; conceptual model; forecast procedure; hail