

张家界多个例降雹过程对比分析

刘 兵^{1,2} 戴泽军³ 胡振菊⁴ 李玉梅² 黄 俊² 黄 萍²

(1. 兰州大学大气科学系, 730000; 2. 湖南省张家界市气象局;
3. 湖南省气象台; 4. 湖南省常德市气象局)

提 要: 利用 NCEP 再分析资料、常规资料及 ECMWF 数值预报产品等资料, 从降雹特征、大气环流形势特征、物理量条件、风暴源地、雷达回波特征等方面入手, 对 2005 年张家界 5 次降雹过程进行深入对比分析。结果表明: 冰雹区具有点、线、面三种分布特征, 不同冰雹灾害过程造成的直接经济损失程度与受灾面积及受灾人口在数量上存在显著的正相关关系; 5 次降雹过程分别发生在高空槽型和东北低涡型两种典型冰雹环流背景形势下, 其中高空槽型影响范围更大, 破坏更强; 较好的水汽条件、对流不稳定条件和较强的垂直风切变促使冰雹等强对流天气过程发生发展; 5 次风暴均初生于地形高度高梯度区上空, 聚集在大山周围及山地偏南区的迎风坡, 说明热力及地形对风暴的生成及能否发展成为冰雹云有着极为重要的作用; 降雹过程均具有典型的冰雹云雷达回波特点和形态, 在风暴体 VIL 密度超过 $4\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的 4 次降雹过程中均产生直径约 2cm 的大冰雹, 说明 VIL 密度对大冰雹具有强的指示作用。

关键词: 冰雹 天气形势 对流参数 垂直风切变 雷达回波

Comparative Analysis of Several Hailing Cases in Zhangjiajie

Liu Bing^{1,2} Dai Zejun³ Hu Zhenju⁴ Li Yumei² Huang Jun² Huang Ping²

(1. College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000; 2. Zhangjiajie Meteorological Office, Hunan Province;
3. Hunan Provincial Meteorological Observatory; 4. Changde Meteorological Office)

Abstract: Based on the characteristics of hailing, characteristics of atmospheric circulation, physical quantity conditions, storm source and characteristics of radar echo, five hailing processes in Zhangjiajie in 2005 were analyzed by using the NCEP reanalysis data, conventional data and ECMWF forecast products. The result shows that the hailing areas are distributed respectively in spots, lines and planes, and the direct economical losses caused by

资助项目: 湖南省气象局重点项目高分辨率数值预报释用技术研究、科技部气象公益性行业专项(GYHY(QX)2007-6-12)共同资助。

收稿日期: 2008 年 4 月 10 日; 修定稿日期: 2009 年 1 月 19 日

different types of hailing processes have a significant positive correlation with the disaster stricken area and disaster stricken population amount. The five hailing processes occur under the typical upper air trough and northeast vortex hailing circulation background respectively, whereas those hails occurred in the upper air trough circulation influence a larger area with greater destruction. Favorable hydrometeor conditions, convective instability conditions and strong vertical wind shear promote the generation and development of strong convection synoptic processes. All the five storms occur in the location with a large gradient of topography, and concentrate around mountains and the windward slopes in south of the mountainous area, which means that the thermodynamic effect and landform play a critical role in the generation of storms and the development into hail cloud. All the hailing processes have the characteristics of typical hail cloud radar echo, and the large hails with a diameter of about 2cm are generated during the four hailing processes with the storm body VIL density of more than $4\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, which means that VIL density has a significant indicating function for large hails.

Key Words: hail weather situation convection parameter vertical wind shear radar echo

引 言

张家界市高山区由于适宜的气候,拥有湖南有名的优质烤烟种植基地,但同时也是湖南冰雹高易发区之一,频繁的冰雹灾害每年都对山区农村特别是优质烤烟区带来不可挽回的经济损失,近年尤以 2005 年最为严重。2005 年 5—9 月,张家界市境内先后出现 5 次强对流系统引起的冰雹灾害,其中有 4 次直接发源于市境西北部桑植县的中高山区,另一次部分发源于西北高山区,因此形成冰雹的源地极为相似,但 5 次过程降雹的强度、雹区的分布及冰雹灾害损失则存在很大差异。近年对冰雹特别是大雹事件的个例分析研究较多^[1-6],但结合冰雹灾害情况对同一地点多次降雹过程进行综合对比分析的文章

还不多见。本文从预报角度出发,对这 5 次降雹过程进行深入对比分析,试图找出不同类型降雹造成灾害程度出现量级差异的原因,并总结出部分冰雹预报指标,对张家界山区防灾减灾具有重要指导意义。

1 降雹特征分析

2005 年张家界市的 5 次降雹过程分别发生在 5 月 1 日凌晨、5 月 17 日凌晨、6 月 21 日下午、6 月 22 日下午和 9 月 8 日下午,其中 3 次出现在 16—18 时之间,2 次出现在 00—03 时之间,与历史统计降雹出现时段分布特征基本一致^[7]。为叙述简单起见,笔者将 5 次降雹过程按时间顺序分别用编号“0501 号”、“0502 号”、“0503 号”、“0504 号”和“0505 号”来表示(见表 1),其中 0503 号和 0504 号降雹过程由

表 1 2005 年张家界市 5 次降雹过程概况

编号	发生时间	发生地点	海拔高度/m	最大雹径/mm	伴随天气现象
0501	5 月 1 日 00:00—01:00	桑植县北部龙潭坪等乡	450~600	20	最大风力 9 级,短时强降水
0502	5 月 17 日 01:00—04:00	桑植、武陵源及慈利 46 个乡镇	400~1000	32	雷雨大风,部分乡镇出现暴雨
0503 和 0504	6 月 21 日 17:00 和 22 日 16:00	桑植县中北部 15 个乡镇	400~700	18	雷雨大风,短时强降水
0505	9 月 8 日 16:30 至 17:30	桑植北部官地坪、八大公山等乡镇	600~1100	20	雷雨大风,最大风力 8 级

于为连续灾害事件且受灾地点相互交叉,在这里作为一次灾害事件对待。

5次降雹过程具有如下特征:(1)2次为连续性冰雹事件,即6月21日和22日连续两日几乎在同一时间、同一地点出现冰雹,其他3次为孤立的冰雹事件。(2)5次冰雹中有4次(0501、0503、0504、0505号)直接发源于桑植县中北部高山区,另一次(0502号)也首先影响桑植县西北部和张家界西部,冰雹源地十分相似。(3)降雹区为平均海拔400m以上山区,降雹时均伴随雷雨大风和短时强降水天气现象。(4)冰雹雹区分布差异明显,呈现出“点”、“线”、“面”三种分布特征。具体而言,0501号和0505号表现出“点”的特点,只影响1~2个乡镇;0503号和0504号表现出“线”的特点,冰雹移动路径呈多条曲线,共有15个乡镇受灾;0502号表现出“面”的特点,同一时间冰雹区成南—北向线状分布,快速自西向东移动,影响张家界市近半数乡镇,全市共有46个乡镇不同程度受灾。(5)降雹过程持续时间存在差异:0501、0505号降雹过程持续时间都在40分钟以内,0503号降雹过程持续时间为50分钟,0502、0504号降雹过程持续时间达150分钟,同一地点降雹时间长度一般在半小时以内。(6)各次降雹过程灾害损失差异大(如图1)。统计显示:2005年张家界市冰雹灾害累计造成直接经济损失达4696万元,不同降雹过程灾害损失程度呈现出几何量级差异,经济损失与受灾面积及受灾人口存在明显的正相关关系。

2 天气背景

在5次降雹过程中,0502号、0503号和0504号降雹过程对张家界市影响最大,造成的直接经济损失最为严重。下面以这3次降雹过程下的两种典型天气背景为重点,利用常规资料和ECMWF资料对5次降雹过程

的天气背景作一简要分析。

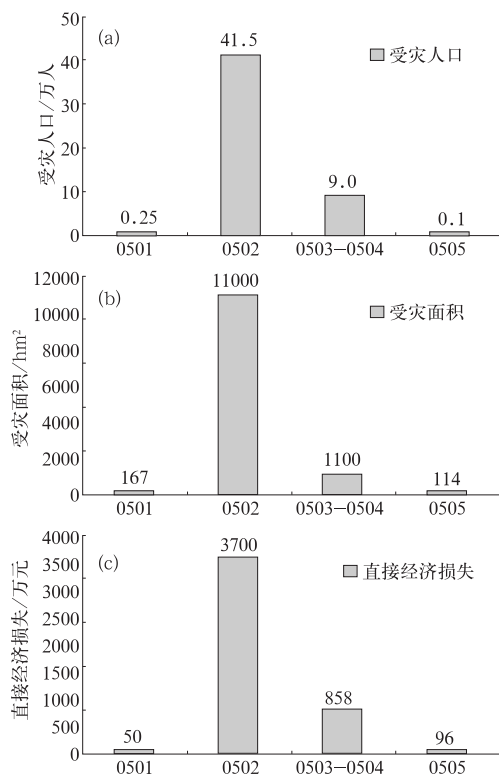


图1 2005年历次冰雹灾害情况对比图

(a) 灾害受灾人口对比图;

(b) 冰雹灾害受灾面积对比图;

(c) 冰雹灾害直接经济损失对比图

(1) 0502号降雹过程发生在5月17日凌晨01—04时,张家界市大部分乡镇自西向东先后遭受强对流天气的袭击,其中45个乡镇先后出现冰雹、大风天气,造成直接经济损失3700万元。这也是近年张家界市影响范围最广、受灾人口最多,遭受损失程度最大的一次冰雹大风灾害。

5月15—16日500hPa图上位于新疆东部的横槽在槽后冷空气带动下快速转竖,16日20时竖槽处于西安、鄂西到贵阳一线,槽后为一致的西北气流,并有强温度槽与之配合。槽前怀化、常德到武汉一线出现 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南急流,急流轴呈西南—东北走向。15日20时700hPa低槽超前于500hPa

的横槽,16日20时700hPa低槽北段仍超前于500hPa竖槽北段,但南段已明显落后于500hPa低槽南段,这样500hPa竖槽南段槽后冷空气和700hPa以下低槽南段槽前暖湿空气之间就形成一个上干冷下暖湿的不稳定结构,垂直切变强烈,表明当时具有很强的对流不稳定性,对强对流性天气的发展极为有利,是导致张家界市17日凌晨01—04时强对流天气的直接诱发因素。16日20时700hPa槽前怀化、石门到荆州一线为 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西南急流。850hPa贵州东部到湘西为高能湿舌,贵阳至铜仁高达 $29\sim 30^\circ\text{C}$ 暖湿舌,而秦岭至渝北为 $13\sim 15^\circ\text{C}$ 的干冷空气。地面冷空气主体位于秦岭,张家界市处于暖低压内。本次强对流是强垂直风切变环境下,高空低槽,高、低空急流,地面冷空气和地面暖低压共同作用的结果,强对流发生位置在500hPa低槽南段与700hPa低槽南段之间,高、低空急流轴的左侧,南、北冷暖气流的交汇处(图2)。

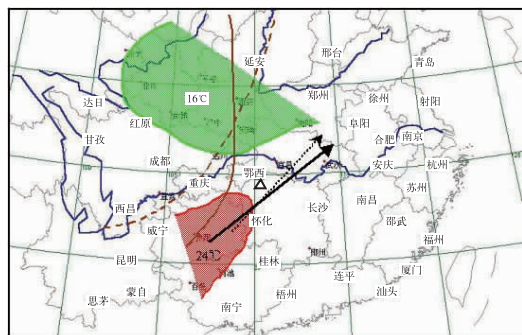


图2 2005年5月16日20时天气形势综合说明图

实线为500hPa槽线,虚线为700Pa槽线;
实箭头为500hPa急流($25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)位置,
虚箭头为700Pa急流($16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)位置;
上方阴影为850hPa低于 16°C 的干冷区域,
下方阴影为850hPa大于 24°C 暖湿舌区;
三角形为强对流天气发生的大致区域

(2) 0503号和0504号降雹过程分别发生在6月21日17时和22日16时,连续性降雹过程具有完全相似且相对稳定的背景形

势,都是在当日晴空天气背景下发生的局部强对流天气,15个乡镇先后遭冰雹大风袭击,9万人受灾,直接经济损失850万元。

图3给出了2005年6月21—22日高空500hPa形势场。我国中、东部的经向环流度非常大,说明亚洲东部高、低纬区间存在着大量的能量、动量和水汽交换^[8]。河套地区为闭合阻塞高压,东北为冷涡,长春经黄海到长江中下游为东亚槽,槽后偏北气流把冷空气源源不断带入长江中下游地区,槽前为大片西南暖湿气流区。高层湘西北为西北气流影响,中低层700~850hPa切变线偏南,张家界市受偏东气流影响,说明700hPa以上存在明显垂直风切变。桑植县城区K指数连续两日在 36°C 以上,说明存在着对流性不稳定条件。低层850hPa长江中下游有一致偏东气流,由于在湘西北和鄂西存在明显的地形抬升作用,气流产生偏北的扰动分量,构成了动力条件。从21—22日下午的下垫面气温来看,桑植城区连续两日下午最高气温在 $33\sim 35^\circ\text{C}$ 之间,地面局地受热明显,构成了热力条件。强对流天气发生的大致区域就处在东亚槽的末端、阻塞高压“Ω”形环流的右侧拐角处。综合分析,这次连续性强对流天气过程是在南北地区发生大量能量交换的大背景下,以下垫面局地受热不均和地形抬升扰动为启动条件,以对流性不稳定和中上层垂直风切变为必要条件,加上高层冷平流等多种因共同作用的结果。

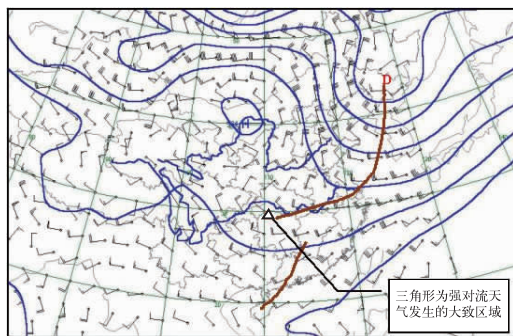


图3 2005年6月21日20时500hPa形势场

(3) 5 次降雹过程环流对比分析

综合分析 5 次降雹过程爆发前 ECMWF 高空及地面资料,有如下几点结论:

① 按 500hPa 环流形势,5 次降雹过程分别发生在东北冷涡(0501 号、0503 号、0504 号)和高空槽(0502 号、0505 号)两种类型天气背景下。同一类型降雹过程的中低层系统配置仍有所不同。② 东北冷涡型降雹过程时,高层 500hPa 河套—秦岭区域内有高脊或阻塞高压配合,中低层鄂西均有切变或扰动,地面处低气压中。如 6 月 21 日和 22 日连续两天下午差不多同一时段出现降雹,并具有完全相似的天气环流形势。③ 深厚的竖槽系统(经向度偏大)配合高低空急流、低层高能湿舌和地面冷空气,极有利于强对流系统和冰雹的产生,这种条件下降雹产生的破坏力很大(如 0502 号降雹过程)。④ 0505 号降雹过程说明鄂西后倾槽系统也是导致张家界市降雹的环流形势之一,但比较少见。⑤ 强垂直风切变环境是典型冰雹形势场的重要特征之一,0501 号、0502 号、0503 号、0504 号降雹过程都存在较强垂直风切变环境。⑥ 长江中下游地区受暖低压控制并伴有低压中心,地面吹偏南风,增温增湿,有利于不稳定能量的累积。

3 降雹的物理条件分析

3.1 资料来源及说明

物理条件分析主要应用探空资料和 NCEP 再分析资料。由于张家界地处恩施、宜昌和怀化三站之间的三角形区域内,与三站的直线距离约为 150~180km,我们选用此三站探空资料进行有关计算分析。对雹区降雹前各种对流参数、垂直风切变及特征层高度等物理量,采用 6 小时间隔的 NCEP 再分析格点资料进行数值计算和分析。

3.2 水汽条件分析

要形成高大的雹云,必须具备较大的不稳定能量或对流性不稳定层结,水汽的垂直分布与温度的垂直分布一样,都是影响气层稳定度的重要原因。利用周边三站探空资料分析 5 次冰雹过程发现,降雹前低层都具备良好的水汽条件,而中高层水汽条件则较差,形成下湿上干的水汽垂直分布。2005 年 5 次降雹过程降雹区 850hPa 温度露点差均低于 5.5℃,而 500hPa 以上是温度露点差大于 17.0℃的干层,这种下湿上干的水汽垂直分布对冰雹的发生发展及形成十分有利。

3.3 大气稳定度条件分析

冰雹爆发前雹区低层一般都有潜在不稳定能量的累积过程。在外部动力条件具备的条件下,大气潜在不稳定能量就会爆发从而产生冰雹。应用 NCEP 再分析格点资料计算 2005 年历次降雹过程发生前降雹区 K 指数、850hPa 与 500hPa 高度间假相当位温差和环境温度差、对流有效位能(CAPE)、对流抑制能量(CIN)和抬升指数(LI)等大气稳定度参数(见表 2、图 4),可以引出以下结论。

表 2 2005 年张家界市降雹过程稳定度对比分析

稳定度	0501 号	0502 号	0503 号	0504 号	0505 号
K 指数/℃	41	39	37	36	38
$\theta_{se850} - \theta_{se500}$ /℃	15.7	14.3	8.4	15.7	8.5
$T_{850} - T_{500}$ /℃	26.5	24.5	26.4	27.6	26.4
CAPE/J·kg ⁻¹	2500	3500	1000	1000	1200
CIN/J·kg ⁻¹	100	50	150	100	60
LI/℃	-7	-7	-4	-4	-6

(1) 2005 年降雹前本地 K 指数均 ≥ 36 ℃,说明发生降雹前本地层结极不稳定。

(2) 假相当位温向上递减的状态,是一种位势不稳定状态,也称对流不稳定状态。可选择上下层假相当位温的差值作为对流性不稳定指数。降雹区 850hPa 的假相当位温

减去 500hPa 的假相当位温之差为正值表示上干冷下暖湿不稳定态。国外经验表明,假相当位温向上递减率达到 $-7^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 时,

则有直径为 3cm 的强降雹。2005 年 5 次降雹前 $\theta_{se850} - \theta_{se500}$ 差值均在 8.0°C 以上, θ_{se} 平均递减率达到 $-3^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

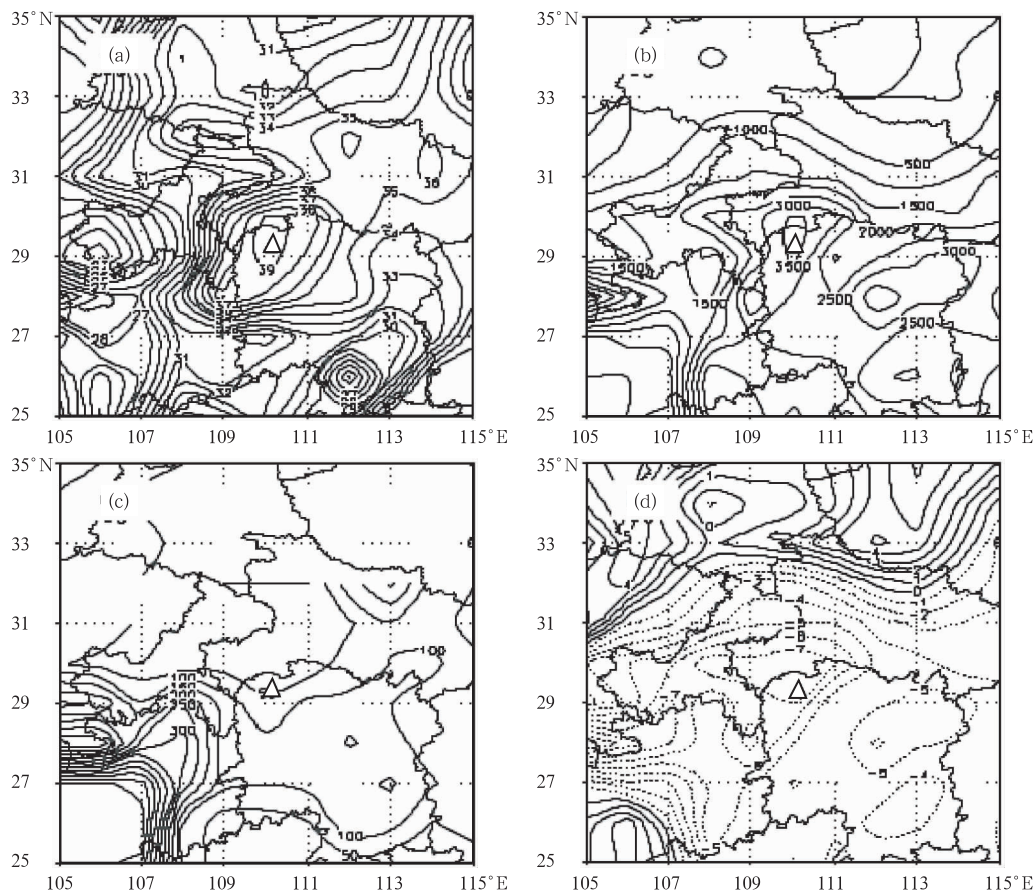


图 4 2005 年 5 月 16 日 20 时对流参数水平分布图

(a) K 指数(单位 $^{\circ}\text{C}$); (b) $CAPE$ (单位 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$); (c) CIN (单位 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$); (d) LI 指数(单位 $^{\circ}\text{C}$)。图中 Δ 标示雹区位置

(3) $T_{850} - T_{500}$ 也是表示大气不稳定性的一种简易方法。统计发现,降雹前雹区 $T_{850} - T_{500}$ 均大于 24°C 。

(4) 对流有效位能 $CAPE$, 表示气块上升过程中所有因温度差异形成的正浮力对气块所做的功。 $CAPE$ 的数值越大, 则 $CAPE$ 能量释放后形成的上升气流强度就越强, 形成降雹的可能性也就越大。2005 年 5 次过程的 $CAPE$ 值都在 $1000\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上, 其中 0502 号达到 $3500\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且雹区就位于

$CAPE$ 最大值中心附近。有关统计表明^[9], 实际大气中 $CAPE \geq 4000\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 者是很少的, 说明 0502 号过程降雹前雹区上空 $CAPE$ 值已经达到很高的水平。

(5) 对流抑制能量 CIN , 表示地表气块上升至自由对流高度之前所必需的外界能量。要发生强对流, 通常认为 CIN 有一个较为适合的值, 太大时抑制对流程度也大, 则对流不容易发生, 太小时不太强的对流很容易发生, 低层不稳定能量得以提前释放, 从而使

对流不能发展到较强的程度。2005 年 5 次降雹过程降雹前雹区 CIN 值在 $50 \sim 150 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,可以认为,在此区间的 CIN 值处在能够产生降雹的合适取值范围之内。

(6) 抬升指数 LI 是表示条件不稳定的指数,其大小为 500hPa 环境温度与地表空气块绝热抬升至 500hPa 时温度的差值,它反映了地面气块移动到 500hPa 时的不稳定状况。当抬升指数小于 0 时,大气层结不稳定,且负值越大,不稳定程度越大。分析 5 次降雹过程,雹区的抬升指数 LI 值均低于 -4°C , LI 均值为 -5.6°C ,且雹区处于 LI 低值中心附近, LI 最小值与同一时刻的 CAPE 最大值中心几乎重合。5 次降雹过程表明,当抬升指数达到 -4°C ,并有大于 $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的对流有效位能 CAPE 相配合时,有利于普通风暴的形成和发展,可能产生普通冰雹灾害过程;而当抬升指数达到 -7°C ,并有大于 $3500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的对流有效位能 CAPE 相配合时,极有利于强风暴的形成、发展和加强,可能产生较为重大的冰雹灾害过程。

3.4 垂直风切变分析

垂直风切变是指水平风(包括大小和方向)随高度的变化,这里我们分别用 200hPa 与 850hPa 两层内风矢量差的绝对值和 500hPa 与地面风矢量差的绝对值表示。有关统计分析表明,垂直风切变的大小往往和形成风暴的强弱密切相关^[10]。在一定的热力不稳定条件下,垂直风切变的增强将有利于风暴的生成、加强和发展。根据 NCEP 资料计算 0501~0505 号降雹过程发生前雹区垂直风切变结果,200hPa 与 850hPa 间分别为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,对应 500hPa 与地面间分别为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,0502 号过程具有极强的垂直风切变,0501 号、0503 号和 0504 号次之,

0505 号垂直风切变相对较弱。5 次降雹过程发生前雹区垂直风切变的大小与冰雹灾害造成的损失具有较好的对应关系,间接说明了垂直风切变越大,其对风暴的形成和加强作用也就越为明显。

3.5 特征层高度分析

冰雹云是一个高耸的云体,云中对流很强,5、6 月云顶高度可达 13000m 以上的高空,温度一般低至 $-30 \sim -40^{\circ}\text{C}$ 。在云中 0°C 层上下冰雹核随上升和下沉气流不断升降、运动和增大。 -20°C 高度是冰晶产生的高度,在这个高度上,云的相态呈胶性不稳定,有利于云中水滴的增长。过冷却云层厚度(Δh_1)是指 0°C 层与 -20°C 层间的厚度。合适的过冷却层厚度对冰雹的形成和增长有利。融冰厚度(Δh_2)是指 0°C 层到冰雹降落地点之间的高度差。合适的融冰厚度可以使冰雹降落过程中不至于被完全融化。应用 NCEP 再分析格点资料计算 2005 年雹区历次降雹前雹区特征层高度(见表 3)可知:降雹前 0°C 层高度约在 4300~5000m,而 -20°C 层高度高度在约 7600~8000m,过冷却云层厚度在约 3000~3600m,最大融冰厚度为 4540m,该厚度可以看作是张家界市某地产生有效降雹的融冰厚度上限,即超过这一上限,则产生有效降雹的可能性减小。

表 3 2005 年张家界市降雹过程特征层高度(单位:m)

特征层	0501 号	0502 号	0503 号	0504 号	0505 号
0°C 层	4660	4900	4940	4690	4300
-20°C 层	7670	7980	7960	7890	7860
过冷却云层厚度	3010	3080	3020	3200	3560
最大融冰厚度	4210	4500	4540	4290	3700

4 雷达回波特征分析

利用常德太阳山多普勒天气雷达探测资料,对上述 5 个风暴的生成源地、移动特点、

多普勒天气雷达回波结构、风暴体最大垂直伸展厚度、最大垂直累积液态水含量 VIL 等特征进行了对比分析。

4.1 风暴生成源地

在对流不稳定条件下,需要一定的抬升条件对流才能发生。触发对流的抬升条件大多由中尺度系统提供,如锋面、干线、对流风暴的外流边界(阵风锋)、重力波等^[10]。对张家界市而言,地形的抬升作用是触发或加强对流的重要因素之一。张家界市东部为平原区,南部为 800m 左右的中低山区和丘陵区,西北部与鄂西地区交界地带为 1500m 左右的高山区(如图 5),这种地形的分布使得西北部对大气低层气流影响最大,地形的抬升作用也最强。



图 5 张家界市地形图

这种地形的抬升作用可分为两类:第一类是动力扰动引起的。当有中尺度系统存在时,地形的抬升作用就会触发或加强对流的发展。0501 号、0502 号和 0505 号降雹过程就属于这种情况。第二类是热力扰动引起的。张家界地处 30°N 附近,在盛夏往往是全省著名的火炉,下垫面局地受热不均使边界层气流产生扰动,扰动的气流在地形抬升作用下就能触发或加强对流的发展。0503 号和 0504 号降雹过程就属于这种情况。为分析下垫面对风暴形成的作用,将 5 个风暴生成地点叠加在 1km 数字地形图上(图略)。

结果表明风暴生成地的地理分布特点与张家界冰雹地理分布特点相近^[7],5 次降雹过程中有 4 次直接发源于西北高山区地形高梯度区,并具有聚集在大山周围、位于山地偏南区迎风坡的特点;另一次西北高山区作为线源的一端对流首先得到加强。上述特点说明风暴生成源地具有相同共性,即风暴生成在不同性质下垫面的交界处,由于晴天的午后山区或陆面气温明显高于山脚或水面,为强对流天气系统在山区、附近发展提供了更有利的热力不稳定条件;午后由山脚指向山区的扰动温度梯度是造成低空垂直切变的强迫源,扰动温度梯度越大,低空垂直切变越强,越有利于超级单体风暴这类强对流系统的产生。大的温度梯度不但有利于强对流系统形成垂直风切变,而且对地形热力环流的上升运动提供了雷暴的触发机制。总之,2005 年张家界市 5 次降雹过程中有 4 次直接发源于西北高山区,另一次西北高山区作为线源的一端使对流首先得到加强,这不是偶然的巧合,在一定程度上正好说明了中尺度地形抬升对张家界市强对流的触发和加强作用。

4.2 回波形状及持续时间

0501 号和 0505 号降雹过程分别由一个风暴单体引起,有一个强回波中心,组合反射率因子回波强度达 55dBz 以上,回波顶高达 12km,风暴单体在局地发生、发展和消散,持续约 40 分钟。受灾最严重的 0502 号降雹是由 2005 年 5 月 17 日凌晨发生在张家界一条飚线引起。该飚线在雷达回波图上表现为“人”字形回波的一支,类似弓状回波,大致南西南—北东北走向,长 70~90km,宽约 10~15km,回波带上排列着多个风暴单体,约在 17 日 01:00 由西部进入张家界市桑植县,市境内向东移动持续 150 分钟,始终维持一条强回波线,回波强度在 50~70dBz 之间,移动过程中,飚线上的风暴单体不断生成、发展和

减弱消失。0503 号和 0504 号降雹均为多单体风暴引起,回波形状如钩状或弓形,各单体中心回波强度达 60dBz,回波顶高 12km 以上,持续分别达到 50 分钟和 150 分钟。

4.3 风暴体的特征值比较

统计上述 5 次风暴过程结构属性(表 4)表明:5 次风暴过程最大反射率因子强度以 0502 号最强达 70dBz,以 0501 号最小为 55dBz,其余 3 次均在 60dBz 以上。风暴体最大高度(指 30dBz 回波所达到的高度)15km (0502 号),最低 12km (0501、0503、0505 号),基于单体的垂直累积液态水含量(VIL)最大为 0502 号达 $62\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,最小是 0505 号为 $43\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。美国对 WSR-88D 多普勒雷达产品应用情况调查表明,VIL 是在强对流天气识别业务中应用次数最多的产品之一^[11]。由于风暴距雷达的探测距离以及风

暴高度均影响到 VIL 值,Amburn 等^[12]将 VIL 与风暴顶高度之比定义为 VIL 密度。他们的研究表明,如果 VIL 密度超过 $4\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,则风暴几乎肯定会产生直径超过 2cm 的大冰雹。刘治国等^[13]对兰州周边 54 例冰雹云在降雹时段内最大垂直累积液态水含量与地面最大降雹直径之间关系的研究,指出 VIL 密度达到 $2.51\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 将产生直径大 20mm 的大冰雹。分析张家界地区 5 次风暴过程的 VIL 密度,结果显示:①5 次冰雹云的平均 VIL 密度值达 $4.16\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,比兰州周边地区大雹 VIL 密度阈值显著偏大,表明不同纬度地区间大冰雹 VIL 密度阈值存在一定差异;②有 4 次冰雹云 VIL 密度达到 Amburn 等研究的 2cm 的大冰雹理论推算值,且均产生大于或接近 20mm 的大冰雹,说明 Amburn 等研究的结果在湘西北乃至长江中下游地区同样适用。

表 4 2005 年张家界市降雹过程雷达回波特征

特征	0501 号	0502 号	0503 号	0504 号	0505 号
风暴类型	普通单体风暴	线风暴(飚线)	多单体强风暴	多单体强风暴	普通单体风暴
回波形状	钩状回波	弓形回波	钩状回波	弓形回波	钩状回波
最大回波强度/dBz	55	70	65	65	65
风暴体最大高度/km	12	15	12	13	12
最大垂直累积液态水含量 VIL/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	52	62	58	53	43
VIL 密度/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	4.3	4.1	4.8	4.0	3.5
移动特点	少动	自西向东	两条并行曲线	向西南方向移动	少动
风暴持续时间/分	40	150	50	150	40

5 小结

(1) 张家界冰雹雹区具有点、线、面三种分布特征,不同降雹过程对农村地区造成的直接经济损失与受灾面积及受灾人口存在明显的正相关关系。

(2) 5 次降雹过程分别发生在高空槽型和东北低涡型两种典型冰雹环流背景形势下,其中高空槽型降雹过程影响范围更广,雹

灾损失更大。

(3) 通过对比分析,总结出下列本地冰雹预报指标:① 850hPa 温度露点差低于 5.5°C 500hPa 温度露点差高于 17.0°C ,这种上干下湿的水汽垂直分布对产生降雹较为有利;② K 指数 $\geq 35^{\circ}\text{C}$;③ 850hPa 与 500hPa 假相当位温差值 $\theta_{se850} - \theta_{se500} \geq 8.0^{\circ}\text{C}$;④ $T_{850} - T_{500} \geq 24^{\circ}\text{C}$;⑤ 降雹前 0°C 层高度约在 4300~5000m,而 -20°C 层高度高度在约 7600~8000m,两层之间厚度在约 3000~3600m,产

生有效降雹的融冰厚度上限约为 4540m;⑥当抬升指数 $LI \leq -4^{\circ}\text{C}$, 对流有效位能 $CAPE \geq 1000\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 并存在中等强度垂直风切变环境时, 有利于普通风暴的形成和发展, 可能产生普通冰雹灾害过程, 而当抬升指数 $\leq -7^{\circ}\text{C}$, 对流有效位能 $CAPE \geq 3500\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 并存在较强垂直风切变环境时, 极有利于强风暴的形成、发展和加强, 可能产生较为重大的冰雹灾害过程。

(4) 0501—0505 号风暴均生于午后至凌晨时间段内, 生命史 40~150 分钟。5 次风暴均初生于地形高度高梯度区上空, 聚集在大山周围及山地偏南区的迎风坡, 说明热力及地形对风暴的生成及能否发展成为冰雹云有着极为重要的作用。

(5) 不同降雹过程的雷达回波特征存在较大差异, 但都具有典型的冰雹云雷达回波特点和形态, 例如回波强度都在 55dBz 以上, 风暴体最大高度都在 12km 以上, 垂直液态水含量在 $43\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上, 具有弓状或勾状典型回波形态等。不同纬度地区间大冰雹 VIL 密度阈值存在一定差异, 当 VIL 密度达到 $4\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 对湘西北乃至长江中下游地区大冰雹具有较强的指示作用。

致谢: 周雨华高工、叶成志高工和傅承浩高工对本文提供了宝贵建议和帮助, 在此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] 李文娟, 郑国光, 朱君鉴, 等. 一次中气旋冰雹天气过程的诊断分析[J]. 气象科技, 2006, 34(3): 291-295.
- [2] 王华, 孙继松, 李津, 等. 2005 年北京城区两次强冰雹天气的对比分析[J]. 气象, 2007, 33(2): 49-56.
- [3] 廖晓农, 俞小鼎, 于波, 等. 北京盛夏一次罕见的大雹事件分析[J]. 气象, 2008, 34(2): 10-17.
- [4] 宋斌, 李泽春, 刘奇俊, 等. 山东省一次冰雹过程的数值模拟[J]. 气象, 2008, 34(2): 5-11.
- [5] 郭艳, 应冬梅, 刘冬梅. 江西“4·12”降雹过程的多普勒雷达资料分析[J]. 气象, 2005, 31(11): 48-52.
- [6] 王华, 孙继松. 下垫面物理过程在一次北京地区强冰雹天气中的作用[J]. 气象, 2008, 34(3): 18-23.
- [7] 李玉梅, 刘兵, 许利华, 等. 张家界降雹的气候特征分析[J]. 湖南气象, 2007, 24(增): 69-71.
- [8] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 267-278.
- [9] 刘健文, 郭虎, 李耀东, 等. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 91-92.
- [10] 俞小鼎, 姚绣萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 93-94.
- [11] 胡明宝, 高太长, 汤达章. 多普勒天气雷达资料分析与应用[M]. 北京: 解放军出版社, 2000: 146-150.
- [12] Amburn, S A, and Wolf P L. VIL density as a hail indicator[J]. Wea and Forecasting, 1997, 12, 473-478.
- [13] 刘治国, 田守利, 邵亮, 等. 冰雹云垂直累积含水量密度与降雹大小的关系研究[J]. 干旱气象, 2008, 3: 22-28.