

Case Analysis of “4.14 Hail” of Sichuan in 2007

Lingyao Wang¹, Yun Chen^{2*}, Weiguo Xiang¹

¹CUIT, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

²National Meteorological Center, Beijing

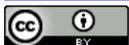
Email: 924569826@qq.com, ychenyun@cma.gov.cn

Received: Nov. 12th, 2015; accepted: Nov. 26th, 2015; published: Nov. 30th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

From 21 to 23 on April 14, 2007, the gale and hailstorm occurred in 10 cities and 27 counties of Sichuan Province, including Chengdu, Meishan, Mianyang and Yibin, etc. In this paper, the live broadcast of the hail weather is described. Besides, using the conventional surface and high altitude meteorological observation data, in combination with other data, the severe convective weather is analyzed, including the large scale circulation background in the formation of the hail, the conditions of moisture, instability, lift and vertical wind shear in formation of the hail from the meso-scale perspective. Finally, the analysis of radiosonde of Chengdu is studied, the results indicate that the strong hail weather will appear if the atmospheric environment could meet the following conditions: warm and wet low layer, cold and dry middle layer, strong rising air currents, suitable 0°C, -20°C layer height and strong vertical wind shear conditions. We hope that the experience of this case analysis will be the reference for the hail forecast in Sichuan area in the future.

Keywords

Hail, Unstable Layer, Upward Movement, 0°C, -20°C Layer Height, Vertical Wind Shear

2007年四川“4.14冰雹”个例分析

汪玲瑶¹, 谌芸^{2*}, 向卫国¹

¹成都信息工程大学, 四川 成都

²国家气象中心, 北京

*通讯作者。

Email: 924569826@qq.com, chenyun@cma.gov.cn

收稿日期: 2015年11月12日; 录用日期: 2015年11月26日; 发布日期: 2015年11月30日

摘要

2007年4月14日21~23时, 四川省成都、眉山、绵阳、宜宾等10市27县区出现了风雹类的强对流天气。本文阐述了此次冰雹天气的实况过程, 利用常规地面和高空观测等资料, 分析了此次强对流天气, 其中包括冰雹形成的大尺度环流背景, 中尺度角度下的水汽、不稳定、抬升以及垂直风切变条件。最后对成都单站探空进行了分析, 成都上空出现低层暖湿、中层干冷的不稳定层结条件, 同时具备强的上升气流, 以及适宜的 0°C 层、 -20°C 层高度和深厚的垂直风切变的条件时, 会出现强冰雹天气。希望从此次个例分析中总结经验, 为今后四川地区冰雹的预报作参考。

关键词

冰雹, 不稳定层结, 上升运动, 0°C 层、 -20°C 层高度, 垂直风切变

1. 引言

冰雹是一种直径一般为5~50毫米, 偶尔会达100毫米以上的固态降水物。它产生于积雨云中, 上升气流使云中的雹胚和过冷水滴数次碰并形成小冰雹。当云中上升气流强度高、水汽充沛时, 冰雹的尺寸继续增大为大冰雹。最后冰雹会因为上升气流对其的承托力不够而降落到地面。

目前, 国内外对冰雹预报的关注点略有不同。在美国, 对于强冰雹的预报主要关注以下三个重要因子[1]: 1) -10°C 到 -30°C 之间的CAPE值; 2) 深层垂直风切变; 3) 0°C 层离地高度。在我国, 由于对某些参数值的资料获取不便, 因此在对冰雹的预报中更侧重于CAPE值大小、垂直风切变以及 0°C 层和 -20°C 高度这三个因子。

在四川, 冰雹常出现在高原附近和盆地山区[2]。本文利用常规地面观测和探空观测等资料, 关注天气过程发生前的高空、地面天气形势[3], 以及有利于冰雹类的强对流天气形成的中尺度天气系统[4]和各种物理量场[5], 结合中尺度对流天气预报规范[6], 对2007年4月14日发生在四川盆地的一次冰雹天气的发生发展过程进行分析, 从中总结有利于本地冰雹形成的机制, 为今后的预报提供参考。

2. 天气实况

2007年4月14日21~23时, 四川省成都、眉山、绵阳、宜宾等10市27县区出现了强风雹类的对流天气过程, 大风一般达到4~6级, 局地超过9~10级, 冰雹最大达直径50毫米。此次强对流天气主要是伴随大风、冰雹的对流天气, 降水量并不是特别多。14日14时在盆地附近出现的风速达到19 m/s的大风天气, 23时~次日02时成都附近及盆地外侧多地出现强雷暴。

3. 环流形势

3.1. 高空环流形势

在4月14日08时500 hPa上(图1)位于欧亚中高纬的三槽分别是东亚长波大槽, 中西伯利亚-贝加尔湖的大槽以及黑海、里海之间的长波槽, 两脊区包括西西伯利亚-巴尔克什湖的高脊以及贝加尔湖弱脊。

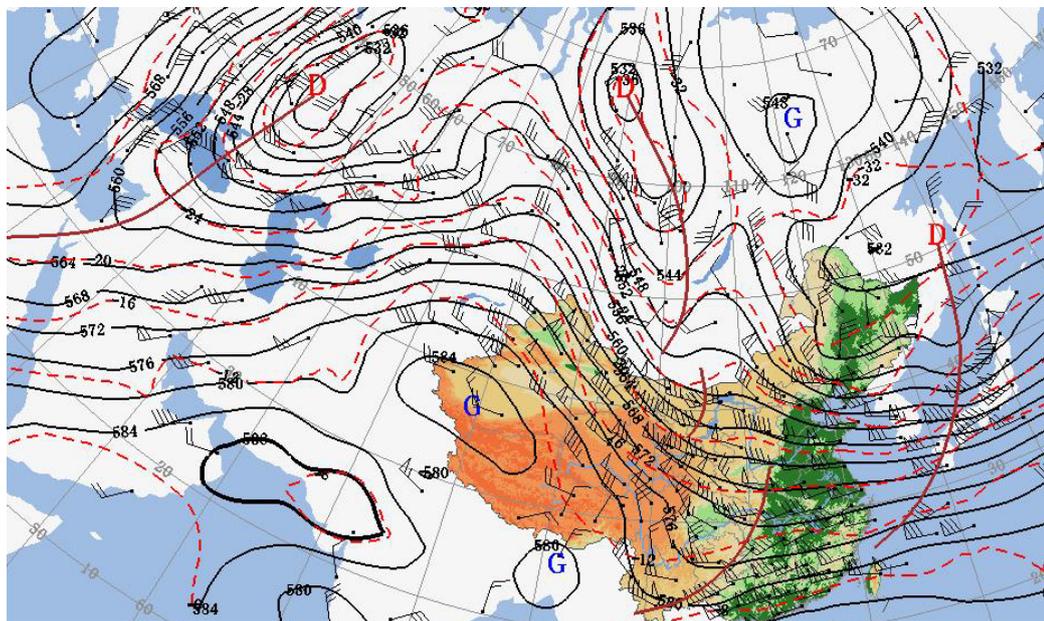


Figure 1. 500 hPa height chart at 8 on April 14, 2007

图 1. 2007 年 4 月 14 日 08 时 500 hPa 高空图

其中位于巴湖的高脊不断向北发展加强，这是因为 12 日、13 日此区温度槽脊落后于高度槽脊，并且位于中西伯利亚的低压稳定存在且不断南压加强，使得巴湖的高脊不断北伸，因此 14 日 08 时，我国西部除高原外绝大部分处在很强的西北气流控制中。在中低纬，13 日 20 时位于达新疆与甘肃的交界处的短波槽，由于槽后西北气流的推动，14 日 08 时移至甘肃中部。并且 13 日 20 时已经移过四处盆地的短波槽继续向东移动，于 14 日 08 时形成从陕西-湖北-贵州-云南的短波槽。因此在 14 日 08 时 500 hPa 亚洲中部形成明显的阶梯槽的形式。此外，青藏高原上有两个闭合的高压。

在 500 hPa 上，对于四川盆地而言，四川盆地处于高原弱脊的偏北气流控制，已经移过的华中短波槽不会对此地造成坏天气，但需要注意高原脊前偏北气流里出现的甘肃短波槽的下滑可能会对盆地带来恶劣天气。同时在 700 hPa 上，四川盆地等温线与等高线近乎垂直且盛行偏北风，变现为强的冷平流向盆地输送。而在 850 hPa 上，西南风携强的暖平流流入盆地。对于四川盆地，从低层流入的暖平流与中层流入的冷平流形成的温度层结不稳定加上高层下滑的短波槽，有利于盆地地区对流天气的出现。

3.2. 地面环流形势

图 2 是 2007 年 4 月 14 日 08 时的地面图，结合 4 月 14 日 02 时、05 时地面图进行比较分析，结果发现：3 个时次的地面图上，在青藏高原东北部一直有一个高压，而四川盆地处于低压控制中，地面的低值系统是形成对流天气的一个有利背景场条件，并且在 08 时的地面冷锋位于新疆塔里木盆地和河套地区，还未进入盆地地区，但是由于此时河套上空 500 hPa 的短波槽的下滑会继续向东南方移动，因此预计位于河套的地面冷锋可能会在夜间对盆地地区造成影响。同时结合成都(56187)、都江堰(56188)、雅安(56287)三站的地面观测资料，从 12 日 02 时开始到 14 日 02 时三站最高气温的变化表现为：成都由 23℃ 上升到 25℃，都江堰由 21℃ 上升到 24℃，雅安由 24℃ 上升到 27℃；而这三站连续三天 08 时的气压变化表现为：成都从 1015 hPa 下降到 1010 hPa，都江堰从 1014.5 hPa 下降到 1009.1 hPa，雅安 1015.3 hPa 下降到 1009.9 hPa，这些表示低层在降压升温，给盆地带来不稳定能量的积聚，一旦地面出现抬升触发机制，盆地地区就会出现对流天气。

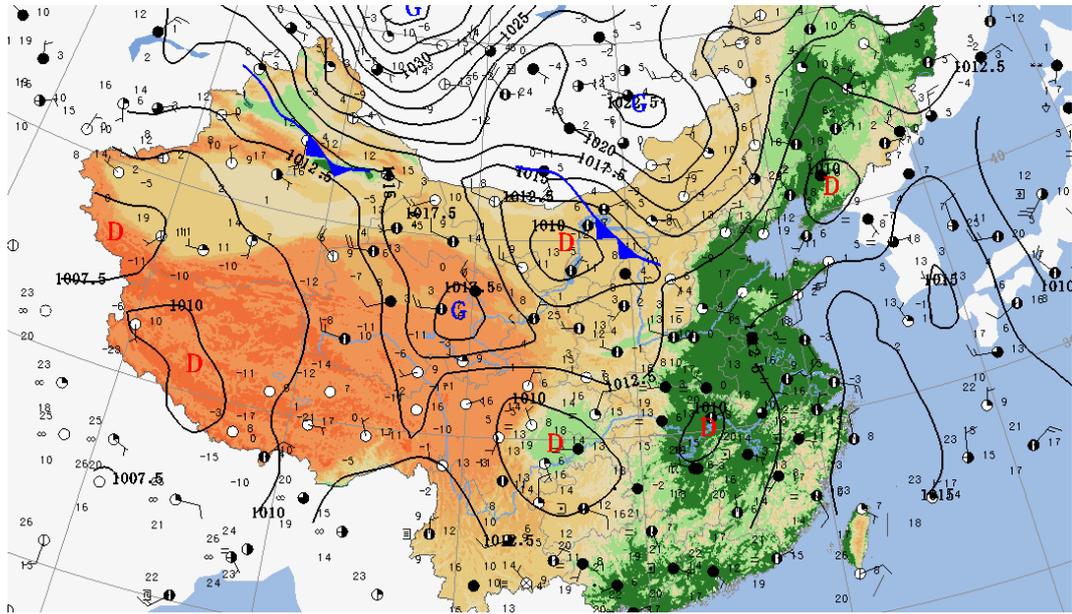


Figure 2. Surface circulation chart at 8 on April 14, 2007

图 2. 2007 年 4 月 14 日 08 时地面分析图

4. 中尺度天气分析

4.1. 天气图分析

4.1.1. 水汽条件

温度露点差用来表示空气中水汽的含量，温度露点差越小，则空气越湿；差值越大，则空气干。图 3(a) 表示 2014 年 4 月 14 日 08 时四川盆地上空 850、700 以及 500 hPa 的干湿分布，从图中分析看到 850 hPa 四川盆地及其东部大范围为显著湿区，500 hPa 盆地上空为干区，由于 700 hPa 上盆地上空的露点差既没有达到显著湿区的标准也不满足分析干区的要求，因此对于盆地而言，其上空的湿层并不是很厚，但是上干下湿的垂直分布带来的位势不稳定仍然有利于对流天气的出现，且此次对流更多的考虑的以大风、冰雹为特点的干对流天气而不是大的降水。

4.1.2. 不稳定条件

图 3(b) 是 14 日 08 时四川盆地 850、700 以及 500 hPa 三层环境温度的分布状况，其中盆地低层暖脊明显，其的西北部 500 hPa 上有冷槽。同时，盆地低层的垂直温差都很大，在 700 hPa 上其值超过 20°C ，500 hPa 盆地 24 小时降温为 -1°C ，因此从这些中尺度不稳定条件分析，四川盆地上空低层为暖平流，中层为较冷的平流，带来位势不稳定，因此对流天气容易出现。

4.1.3. 抬升条件

图 3(c) 是 14 日 08 时四川盆地上空中低层辐合抬升的情况，其中 925 hPa 四川盆地存在东西走向的气流汇合区，因此分析辐合线，而 850、700 以及 500 hPa 东南-西北向的短波槽以及移过四川盆地，位于贵州-云南地区。因此有利于盆地不稳定能量触发的条件主要是 925 hPa 上的辐合线带来的上升运动。

4.1.4. 垂直风切变

垂直风切变可以维持和增强对流风暴的因子，是分析强对流天气一个关键点。在中尺度强对流分析中，急流是很好的垂直风切变的指标。

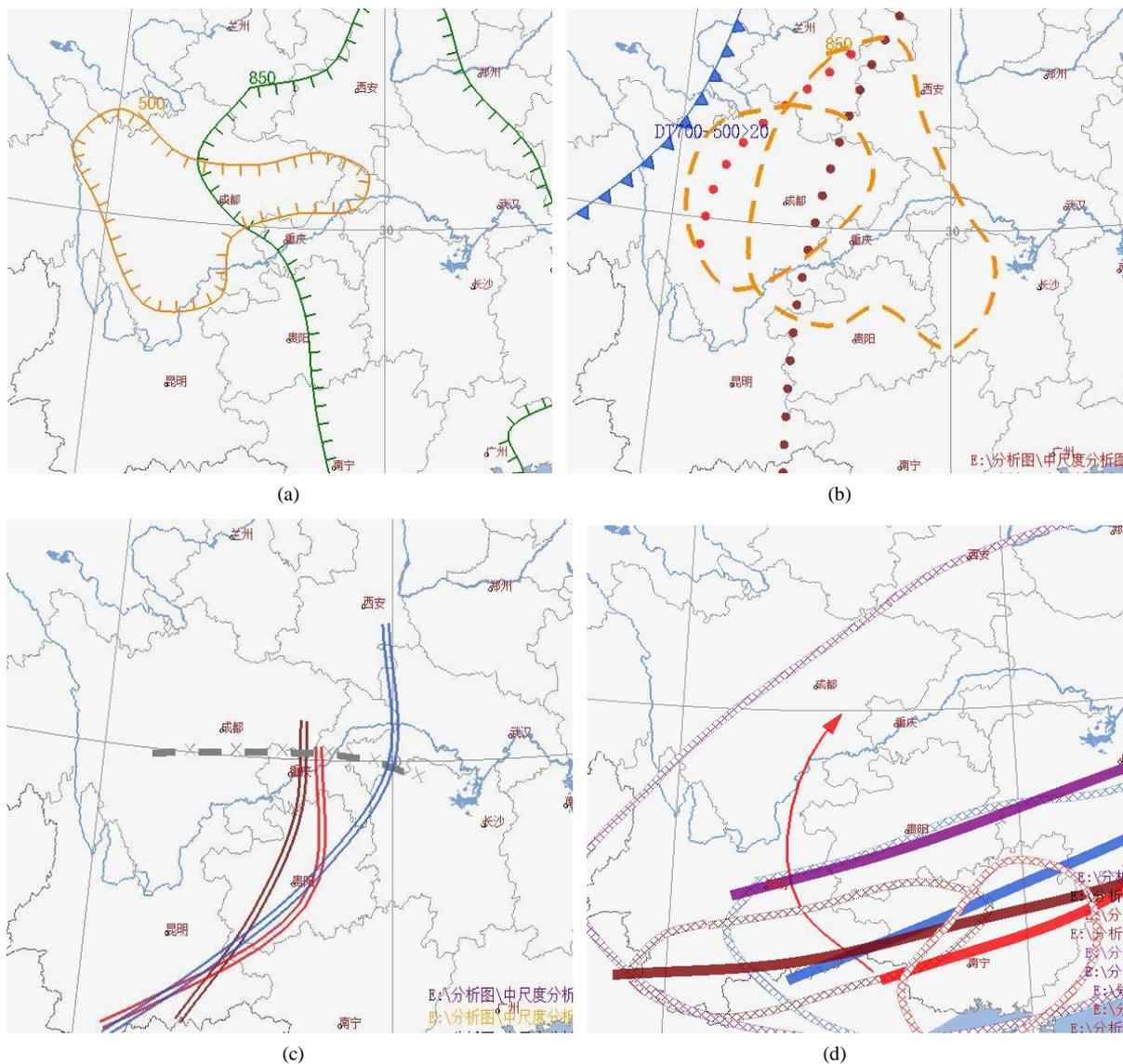


Figure 3. Mesoscale weather analysis chart at 8 on April 14, 2007. (a) Humidity field, (b) Temperature field, (c) Lifting condition in middle and low levels, (d) Vertical wind shear

图 3. 2007 年 4 月 14 日 08 时中尺度天气分析图。(a) 湿度场分析图, (b) 温度场分析图, (c) 中低层抬升条件分析图, (d) 垂直风切变分析图

从图 3(d)中可以看出从低层到高层, 大风速带集中位于四川地区南部呈东西走向, 但在 850 hPa 上大风速带附近存在向四川盆地辐合的标识流线, 但更高层没有, 说明在低层存在向盆地输送的暖湿气流但强度不大, 因此此次对流天气带来的降水量不会很多。同时 850 hPa 到 500 hPa 之间高度上的急流核位于四川盆地的南部, 只有高空 200 hPa 的急流核范围很大, 包括四川盆地, 这表示此时盆地高层的高空急流很强, 高空急流的抽气和通风作用带来的辐散作用很强, 反而中低层辐散作用很弱, 盆地容易出现强的上升气流。

图 4 是结合中尺度对流环境场中对此次冰雹天气形成的有利条件的综合分析。对于四川盆地地区而言, 低层空气是暖而湿度, 中层是干而较冷的平流, 因此上下之间位势不稳定明显。加上低层辐合, 高空的强辐散区带来的强而持续的上升运动, 使能量得以释放, 因此盆地出现冰雹天气。

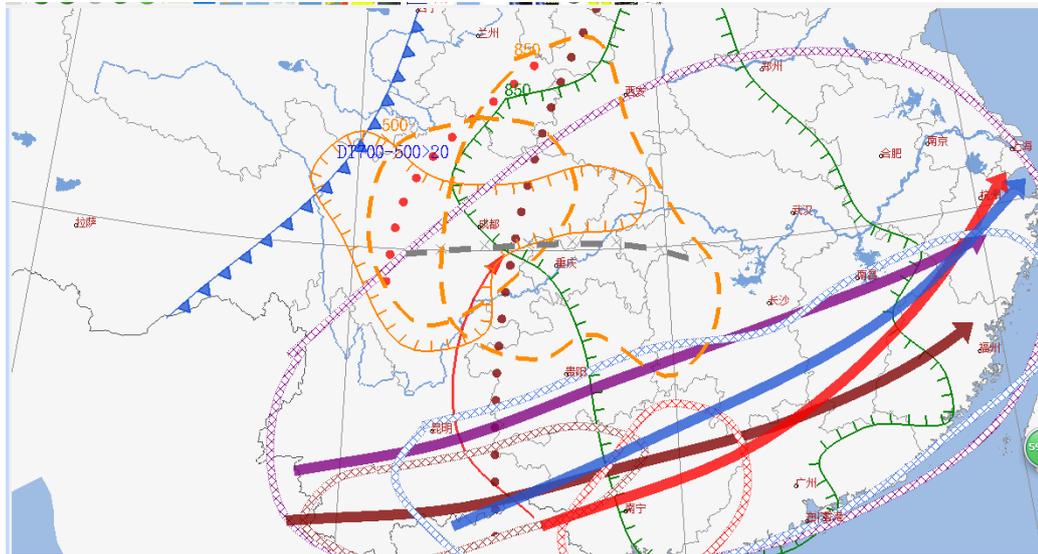


Figure 4. A synthesizing mesoscale weather analysis chart at 8 on April 14, 2007

图 4. 2007 年 4 月 14 日 08 时中尺度背景的综合分析

4.2. 诊断物理量场分析

4.2.1. 水汽条件相关

图 5 包括对 850 hPa 的比湿 q 、相对湿度 rh 、温度露点差 $t-t_d$ 、假相当位温 θ_{se} 、水汽通量散度和 700 hPa 的水汽通量散度。对于四川盆地而言，比湿大于 8 g/kg ，相对湿度超过 70%，温度露点差小于 5°C 并且假相当位温也超过预报规范中的 320 K ，所以，对于盆地而言此时大气低层中的湿度很大。再结合图 5(e)、图 5(f)，850 hPa 的水汽散度零线正好过成都，水汽在成都以北辐合，以南辐散，700 hPa 整个盆地有水汽辐散。因此结合这六张图分析，14 日 08 时四川盆地低层水汽充足，低层水汽的辐合主要是在成都的东北部，而盆地地区的水汽是以辐散为主，因此此次天气过程不是以降水为主的对流天气。

4.2.2. 稳定度相关

结合图 6 中的 K 指数、 SI 指数以及 LI 指数分布，四川地区从西往东 K 值在增大， SI 值在减小，而整个四川地区 LI 指数都是正值。同时，盆地地区的 K 指数大部分都超过 30°C 或接近 30°C ，盆地内的 SI 值都为负值，并且成都附近为低值中心 (-2°C)。因此结合这三个物理量的分布分析，4 月 14 日 08 时，四川盆地上空大气处于不稳定状态，有利于对流天气出现。

5. 探空分析

探空分析是使用探空观测资料在短期内判断中尺度天气发生可能性的过程，在分析中着重关注对流系统的局地垂直环境场[7]。

5.1. 冰雹预报指数分析

对比图 7(a) 中两折线发现：在 13 日 20 时之前， K 值在 30°C 附近，而 SI 值有正有负，指示无对流天气，在 13 日 20 时， K 值达到 38°C ， SI 值也由正值变成负值。在 14 日 08 时和 20 时， K 值继续保持大值趋势， SI 值继续下降，20 时达到最低 -3.8°C 。因此结合这两种数值变化，从 13 日 20 时 K 值超过 32°C ， SI 值小于 0°C ，开始关注对流发生的潜势，在 14 日 20 时的值可以指示强对流天气[8]。强对流发生后，由于不稳定能量的释放，在 15 日 08 时， K 值急速下降为 17°C ， SI 值也突增为 11.56°C 。

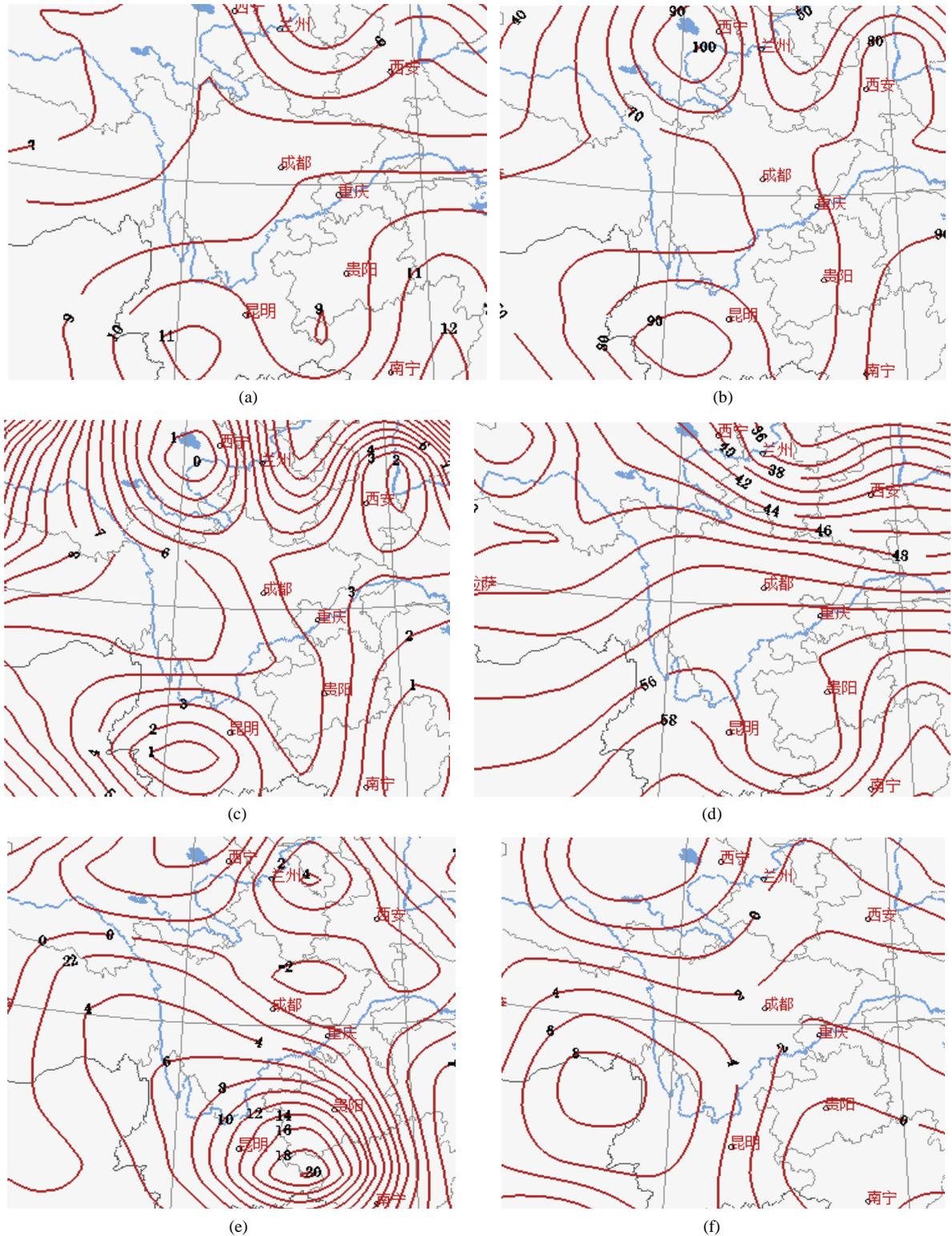


Figure 5. The moisture-related parameter's field at 8 on April 14, 2007. (a) Specific humidity in 850 hPa, (b) Relative humidity in 850 hPa, (c) Dew-point temperature difference in 850 hPa, (d) Pseudoequivalent potential temperature in 850 hPa, (e) Moisture flux divergence in 850 hPa, (f) Moisture flux divergence in 700 hPa

图 5. 2007 年 4 月 14 日 08 时水汽相关物理量场分布。(a) 850 hPa 比湿场, (b) 850 hPa 相对湿度场, (c) 850 hPa 温度露点差场, (d) 850 hPa 假相当位温场, (e) 850 hPa 水汽通量散度场, (f) 700 hPa 水汽通量散度场

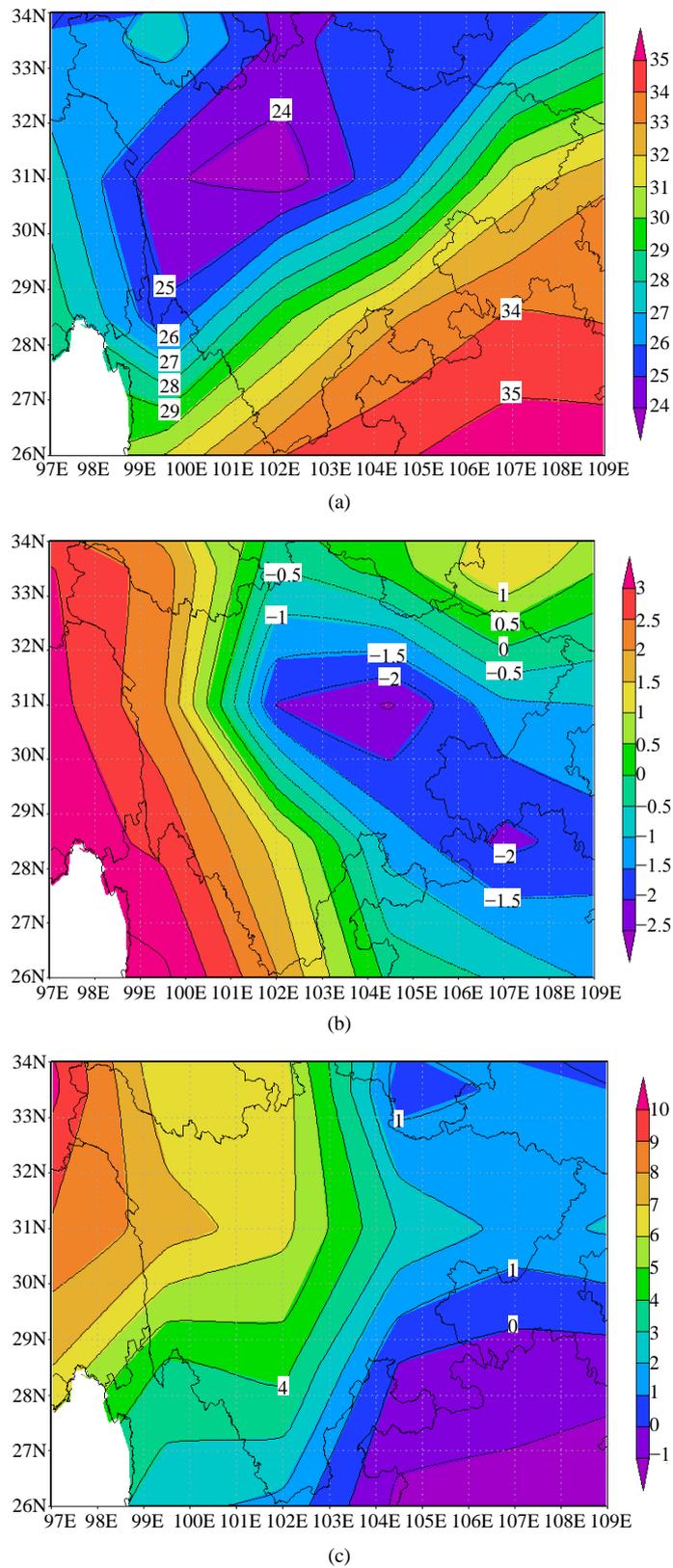


Figure 6. The stability-related parameters' field at 8 on April 14, 2007. (a) K index, (b) SI index, (c) LI index

图 6. 2007 年 4 月 14 日 08 时稳定度相关指数分布图。(a) K 指数分布图, (b) SI 指数分布图, (c) LI 指数分布图

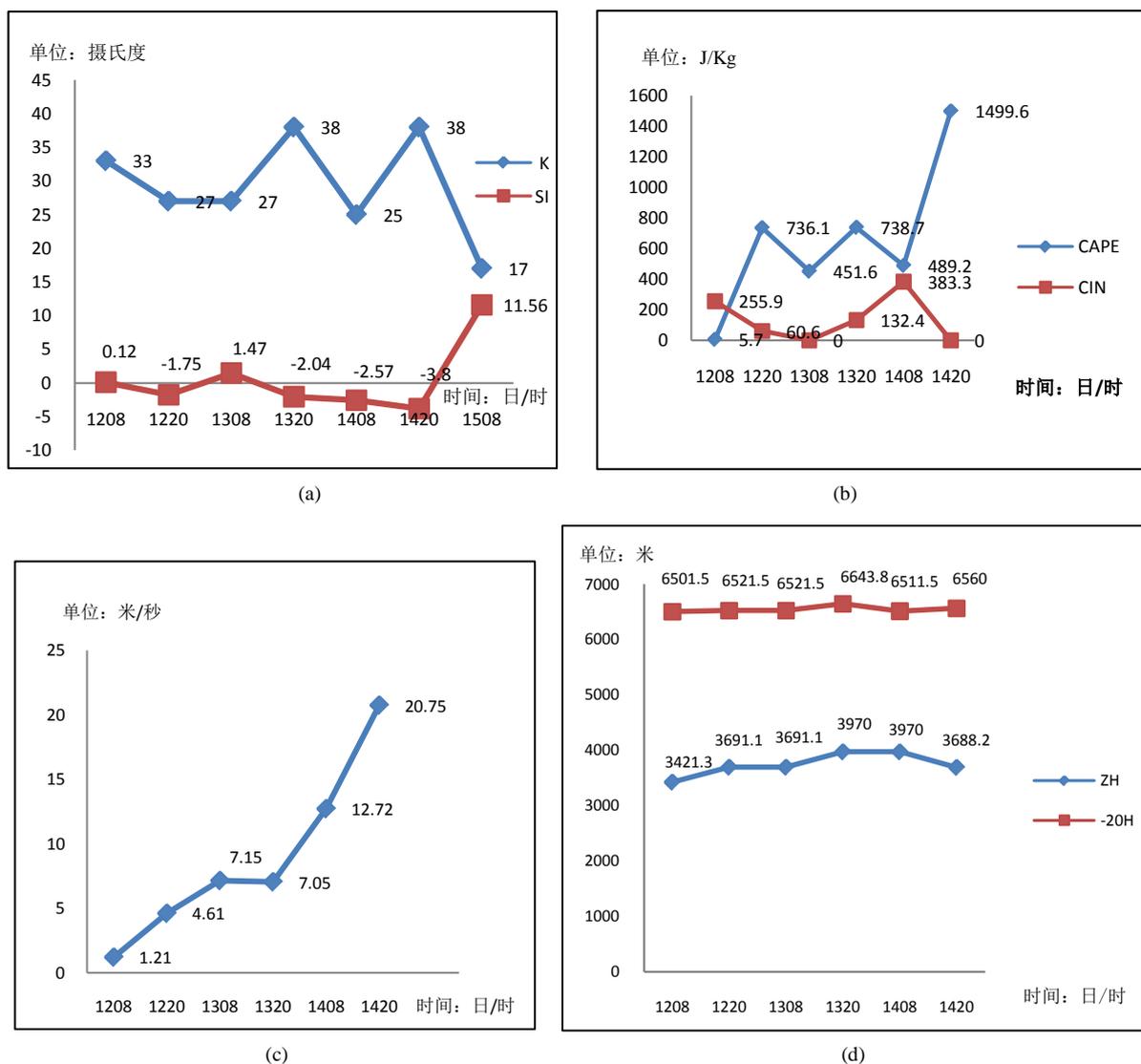


Figure 7. The time-change of prediction index in Chengdu. (a) K & SI index, (b) CAPE & CIN, (c) Wsr0-6, (d) ZH & -20 H

图 7. 成都地区预报指数的时间变化图。(a) K 指数&SI 指数, (b) CAPE 值&CIN 值, (c) Wsr0-6 (d) ZH & -20H

CAPE 值可以用来指示气层不稳定能量的大小, CIN 值相反。在图 7(b)中, 只有 12 日 08 时的 CAPE 值小于 CIN 值, 其余时刻总是 CAPE 值大于 CIN 值, 并且 CAPE 值一直处于上升的趋势, 单从二者数值分布说明, 在 12 日 08 时之前的大气处于稳定状态, 在此之后中空气中总有不稳定的能量积累。在 14 日 20 时 CAPE 值高达 1499.6 J/Kg, 且 CIN 值低于 200 J/Kg, 对强对流天气的指示意义很大。

深厚的垂直风切变是冰雹产生的重要因子之一, 常用 Wsr0-6 表示。在暖季, 如果 $Wsr0-6 \geq 15$ m/s 则属于中强度大小, 如果 $Wsr0-6 \geq 20$ m/s 则垂直风切变很强[1]。由图 7(c)分析: 自 12 日 08 时开始, 成都上空垂直风切变几乎线性增大, 在 14 日 08 时风切变接近中等程度, 当晚 20 时成都上空为强的垂直风切变。

有利于冰雹的生成和降落的关键性因子是 0°C 层高度(ZH)和 -20°C 层高度(-20H)。一般 -20°C 层离地面 7.5 km (400 hPa) 左右或以下, 0°C 层位于 4 km (或 600 hPa) 附近, 这样既保证云体发展, 又有助于雹体

生长且保证其下落时不会因过长时间的升温而消失。分析图 7(d)，成都上空两个温度层的高度变化趋势不大， -20°C 层高度总维持在 6.5 km 附近， 0°C 层的高度在这段时间内离地面都不高，有益于冰雹的形成与降落。

综合上述冰雹发生前的预报因子发现，对流不稳定的指数表现为：K 指数达到 38°C 、SI 指数低至 -3.8°C 、CAPE 值超过 1400 J/值，表明大气强的对流不稳定，导致大气中的热力浮力大，因此空气中就会出现强的上升气流。同时，两层高度适宜且风切变大，成都很有可能发生冰雹天气。

5.2. T-lnP 曲线分析

图 8(a)、图 8(b)分别为 2007 年 4 月 14 日 08 时和 20 时的成都探空站 T-LogP 图，从以下几个角度分析：1) 从湿度分布角度看，08 时的探空图中 700 hPa 以下成都上空露点、层结两曲线十分靠近，而两曲线的形状在 700 hPa 以上为喇叭状，表明中低层中水汽含量较大而上层很干[9]；到了 20 时，850~700 hPa 露点曲线与层结曲线几乎重合，700~500 hPa 二者还是相差较大，这表明中低层的水汽更加充足，中层湿度仍然很小，因此上干下湿的不稳定状态得到加强；2) 从能量角度看，08 时图中层结、状态曲线围成的正、负面积差不多，而 20 时图中正的面积远超过负的，表明对流不稳定能量增大。并且在 08 时，成都近地面以及 700 hPa 附近存在逆温层，它有利于不稳定能量的积聚然后在某个触发机制下造成强对流；3) 从平流角度看，08 时和 20 时从低层到高层风向变化由顺时针变为逆时针，这表明低层有暖平流，高层为冷平流，上冷下暖有利于对流不稳定。综上，14 日 08 时到 20 时，成都上空大气越来越不稳定，强对流天气出现的可能性增大。

6. 结论

本文利用 2007 年 4 月 12 日~15 日常规观测资料、探空资料以及数值预报资料等，对此次冰雹形成的分析总结如下。

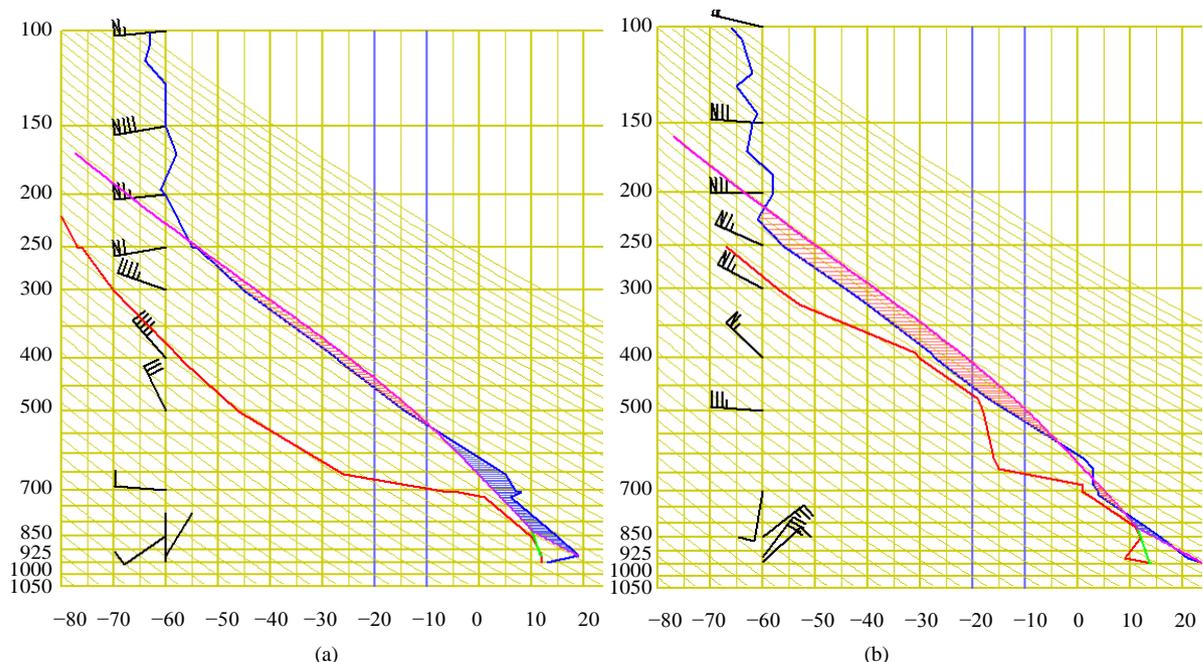


Figure 8. Tlogp of Chengdu on April 14th, 2007. (a) 08:00, (b) 20:00
图 8. 2007 年 4 月 14 日成都的 Tlogp。(a) 08 时，(b) 20 时

1) 这次冰雹天气过程发生前期的高空大尺度环流背景属于阶梯槽型, 在 14 日位于盆地上游的短波槽下滑以及地面盆地内部连续的升温降压带来的不稳定能量的积聚, 最后盆地地区的上升运动对该地区之前积聚的不稳定能量的释放, 是冰雹形成的大尺度背景;

2) 从天气过程前期的中尺度天气图分析, 低层显著湿区、中层干区以及低层的温度脊、中层的温度槽和低层垂直温度差的分布, 形成了盆地低层暖湿而中层干冷的温湿结构, 为冰雹的形成贮备了必需的不稳定能。高、低空急流带来的强的风速垂直切变, 有利于盆地积聚的不稳定度倾向增大。最后在高低辐合、辐散形成的上升气流作用下不稳定能释放, 这是冰雹形成的中尺度背景;

3) 从天气过程前期的中尺度诊断物理量场分布分析, 盆地低层水汽相关物理量的分布表明盆地地区水汽充沛但存在水汽向外辐散, 并且 K 指数、SI 指数、LI 指数都表明大气中不稳定能量的存在, 因此强对流天气应以冰雹为主而不是降水;

4) 成都站降雹前的探空分析过程: 首先从探空图中低层暖湿平流、中层干冷平流的分布以及图中正能量的面积远大于负能量的面积可以看出成都上空不稳定能量很大。然后是成都单站 K 指数、SI 指数、CAPE 值都达到强对流标准, 意味着空气中强上升气流的存在。同时, 0°C 层高度在 4 km 左右, -20°C 层高度在 7.5 km (400 百帕) 或以下, 且 0~6 公里的垂直风切变超过强垂直风切变标准。因此不稳定能量大、强的上升气流、适宜的 0°C 和 -20°C 层高度以及深厚的垂直风切变都是成都产生冰雹的重要因素。

致 谢

本论文是在成都信息工程大学大气科学系向卫国老师及国家气象中心谌芸老师的悉心指导之下完成的。在论文创作过程中, 两位老师对于我提出的疑问, 总会给予细致的解答并给出写作建议。这使我的论文结构日益完善, 内容日趋丰满。他们渊博的专业知识, 严谨的治学态度, 朴实无华的人格魅力对我影响深远, 赋予我终生受益无穷之道。在此, 我谨向向卫国老师及谌芸老师致以最诚挚的感谢和崇高的敬意!

本论文的完成也离不开其他各位老师、同学和朋友的关心与帮助。感谢大学四年中教导我的老师们, 是你们为我们传授专业知识, 提高我们的专业水平。我还要感谢父母在我求学生涯中给与我的支持与鼓励, 谢谢你们!

最后向在百忙之中评审本文的各位专家、老师表示衷心的感谢!

基金项目

国家自然科学基金面上项目(41175048)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206004)、(GYHY201406003)共同资助。

参考文献 (References)

- [1] Witt, A., Eilts, M.D., Stumpf, G.J., Johnson, J.T., De Wayne Mitchell, E. and Thomas, K.W. (1998) An Enhanced Hail Detection Algorithm for the WSR-88D. *Weather and Forecasting*, **13**, 286-303.
[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<0286:aehdaf>2.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<0286:aehdaf>2.0.co;2)
- [2] 潘建华. 新 30 年四川冰雹特征分析[J]. 四川气象, 2005(1): 28-30.
- [3] 程华利. 泰顺 4.7 特大冰雹分析总结[J]. 科技创新导报, 2010(8): 252-253.
- [4] 陆汉城, 杨国祥. 中尺度天气原理与预报[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 41-276.
- [5] 黄元森, 丁光义, 陈小梅. 2012 年 2 月 23 日冰雹过程的中尺度特征分析[J]. 海峡科学, 201, 68(8): 9-11.
- [6] 张小玲, 等. 中尺度天气分析业务技术规范[M]. 北京: 国家气象中心, 2012: 5-16.
- [7] 何立富, 周庆亮, 谌芸, 等. 国家级强对流潜势预报业务进展与检验评估[J]. 气象, 2011, 37(7): 777-784.
- [8] 张霞, 苏爱芳, 等. 单站要素特征量在冰雹天气预报中的应用[J]. 河南气象, 2006(3): 24-26.
- [9] 曾勇, 陈定梅, 史华锋. 西藏山南地区浪卡子县罕见强冰雹成因分析[J]. 西藏科技, 2009, 192(3): 50-52.