

王晓玲,龙利民,王珊珊.一次春季冰雹过程的成因分析[J].暴雨灾害,2010,29(2): 160-165

一次春季冰雹过程的成因分析

王晓玲,龙利民,王珊珊

(武汉中心气象台,武汉 430074)

摘要:从不稳定条件、水汽条件、抬升触发条件出发,利用高时空分辨率的 LAPS 局地再分析系统资料和地面加密自动站信息,对 2009 年 4 月 15 日湖北省西部大范围降雹过程进行了分析。结果显示:当高层有干冷空气,低层暖湿气流发展,垂直温度递减率明显增大,配合对流层低层切变带来的动力抬升作用,易形成降雹;冰雹天气主要不稳定能量来源于地面到对流层低层,地面干线(露点不连续线)及锋面是不稳定能量释放的主要触发条件;冰雹落区主要位于对流层低层及地面高能区重合区域,且易发生在靠近露点及温度的不连续线一侧;垂直风切变越大,越有利于产生尺寸较大的冰雹。

关键词:强对流;干线;锋面;地形抬升;垂直风切变

中图分类号:P458.1*21.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-9045(2010)02-0160-06

1 引言

我国地处东亚季风区,冷暖空气活动频繁,夏半年冰雹、雷雨大风和局地短时强降水等强对流天气十分活跃,给基础设施和社会经济造成了重大损失。强对流天气对国计民生的影响日益显著,社会对其预报的要求越来越高。但是强对流天气系统一般是在几个小时甚至十几分钟之内迅速发生、发展,具有明显的中尺度特征,这给预报带来一定的难度。国内外很多学者对其做过深入研究,Bosart^[1]通过分析一个中尺度与天气尺度系统相互作用的个例,指出天气尺度形势对中尺度环流的起源和发展起控制作用。王笑芳等^[2]分析概括出北京地区冰雹落区的概念模型,并利用北京 08 时单站探空资料制作强对流天气有无及强度的判断树方法。刘小红等^[3]利用北京 325 m 气象塔资料对 1993 年 4 月 9 日北京地区出现的一次特大强风过程的边界层结构进行了分析。葛润生等^[4]根据单多普勒天气雷达、天气资料和卫星云图分析了北京 1995 年 6 月 25 日的冰雹天气,探讨了雹暴气流的结构。

国内各级台站从业务预报的需求出发,也不同程度地开展了强天气的潜势预报和短时临近预报,但是由于国内开展与强天气预报有关的中尺度天气分析比较晚,加上数值模式精度的欠缺,在很大程度上制约了对产生强对流的中尺度天气的认识。随着近年来数值模式产品精度的不断提高以及地面加密自动站的应用,给我们提供了对中小尺度天气认识的条件。为了进一步了解冰雹、雷暴大风等强对流天气发生发

展的物理机制及演变特征,提高对强对流天气的认识,本文拟从层结不稳定条件、水汽条件、抬升触发条件三个方面来对 2009 年 4 月 15 日鄂西冰雹大风过程进行诊断分析,以期从中能获得对强对流天气预报有指示意义的指标及参数,从而提高对灾害性强对流天气的预报能力。

2 资料来源及过程实况

本文所用资料以武汉暴雨研究所引进并本地化后的局地分析系统 LAPS 再分析产品为主,其水平分辨率 10 km,时间分辨率 3 h,垂直分层 21 层,该产品融合了华中 8 部雷达(武汉、宜昌、恩施、十堰、常德、长沙、南昌、九江)及 12 个探空站的资料。此外,分析时还用到了雷达和地面自动站网加密观测资料。

2009 年 4 月 15 日傍晚至 16 日凌晨,湖北省十堰、神龙架、宜昌、恩施等地区出现大风、冰雹、短时强

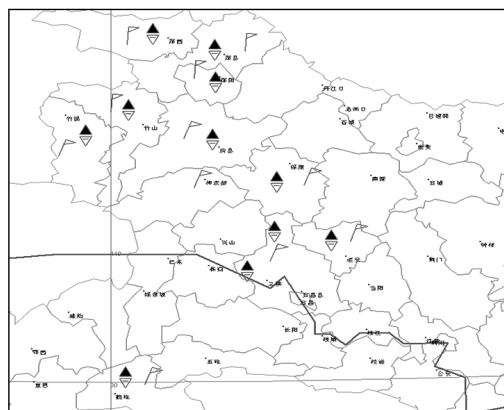


图 1 2009 年 4 月 15 日傍晚至 16 日凌晨强天气实况分布图

收稿日期:2010-05-06;定稿日期:2010-06-03

基金项目:湖北省气象局重点基金项目(2010Z01)资助

作者简介:王晓玲,女,1979 年生,工程师,主要从事短期天气预报技术和方法研究。E-mail: w_x_ling@163.com

降雨等强对流天气(图 1),其中夷陵区樟村坪镇冰雹最大直径 6 cm,持续时间达 90 min。据观测,十堰主要降雹时段为 15 日 17 时 10 分至 17 时 30 分、恩施为 19 时左右,神农架林区为 15 日 21 时左右,宜昌为 15 日 22 时左右。此次过程主要以冰雹、短时雷雨大风等对流性天气为主。

3 环流背景及主要影响系统

冰雹、雷雨大风等强对流天气是由中小尺度系统引起的,但是它的发生发展与大尺度环流背景有着密切的关联。图 2 给出了 4 月 15 日 08 时和 20 时的 850 hPa 实况与中尺度系统叠加图。

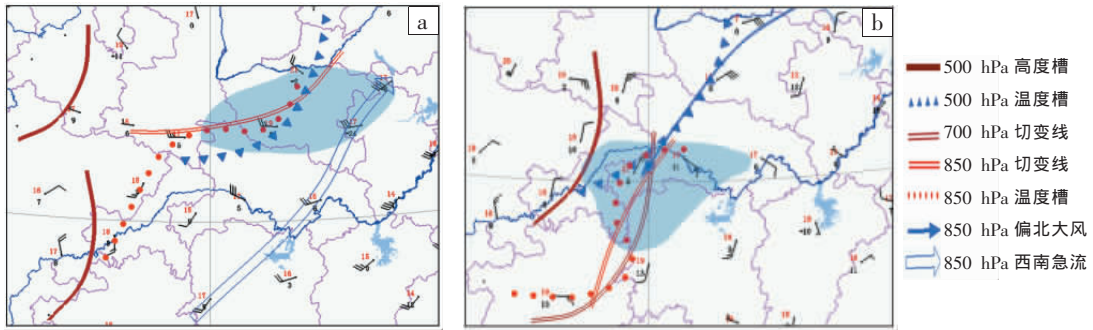


图 2 2009 年 4 月 15 日 08 时(a)和 20 时(b)850 hPa 实况与中尺度系统叠加图
(蓝色阴影区为 $T_{850-500} \geq 30$ °C 区域)

由图 2 可以看出,此次冰雹过程 15 日 08 时 850 hPa 存在一显著西南急流,大风核位于河北,风速达 16 m/s,同时,高空有低槽东移,十堰地区处于 500 hPa 温度槽和 850 hPa 温度脊交界处,说明高空有冷平流活动,低空有暖平流发展,使得垂直方向温度直减率增加,由图 2a 的蓝色阴影可以看出,鄂西北 $T_{850-500} \geq 30$ °C,形成上冷下暖的不稳定层结,在 850 hPa 切变线右侧以及低空西南急流左侧形成的强迫抬升作用下,十堰地区发生强对流天气。15 日 20 时,500 hPa 低槽东移至陕南到重庆一线,其温度槽及 850 hPa 温度脊也南压, $T_{850-500} \geq 30$ °C 区域也转移到鄂西南,宜昌地区正好位于其北部边缘,加上 850 hPa 与 700 hPa 切变线起到动力抬升作用,强对流天气开始发展;与此同时,850 hPa 鄂西北到鄂西南有 ≥ 12 m/s 东北大风出现,湖南地区维持西南气流,两股气流在鄂西南交汇,形

成风向、风速辐合,加剧了宜昌地区的抬升运动,导致宜昌地区出现直径为 6 cm 的百年一遇大冰雹。分析图 2a、2b 可发现冰雹天气一般出现在高空温度槽和低层温度脊交界处的强烈不稳定区域,当垂直方向上出现明显的温度直减率,配合中低层的切变带来的动力抬升作用,加上一定的触发条件,将有利于强对流天气出现。

4 强对流天气形成主要条件分析

大尺度环流背景提供了强对流发生发展的环境条件,而时间短、范围小、发展迅速的强对流的发展主要受边界层的环境条件如地形、日变化和对流自身发展等影响,在时空上呈现明显的中尺度变化^[5]。早有研究指出中尺度对流天气是由层结不稳定、一定的水汽条件和抬升触发这三个主导因子造成的。

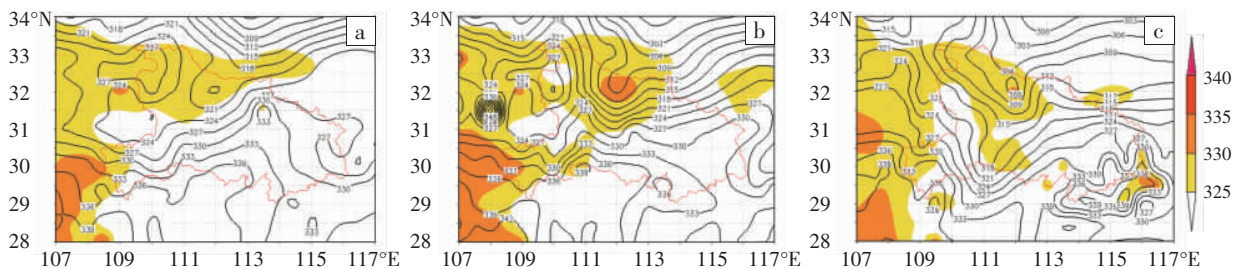


图 3 2009 年 4 月 15 日 17 时(a)、15 日 20 时(b)、4 月 16 日 02 时(c)700 hPa(阴影区)与 900 hPa(等值线) θ_{sc} 叠加场(单位:K)

4.1 层结不稳定条件

冰雹的产生与大气层结不稳定密切相关,它是强对流天气发生的主要因子之一。假相当位温(θ_{sc})是湿空气动力学提出的概念,能够同时表征大气的能量以及潜在不稳定,是用能量学方法研究强对流天气的有效参数。

图 3a 为强对流开始阶段,可以看出 700 hPa 鄂西北已经处于 $\theta_{sc} \geq 325$ K 的高能区,鄂西南高能区域则不断扩大,相应的 900 hPa 在鄂西北到鄂西南存在一个弱的 θ_{sc} 锋区;15 日 20 时(图 3b),鄂西北、鄂西南均处于 700 hPa 高能区,900 hPa θ_{sc} 锋区加强,神龙架到宜昌各伸出一高能舌,此时也正是这两个地区发生

冰雹的时间;16日02时(图3c)700 hPa高能区减小,900 hPa θ_{sc} 锋区已经压到南部,此时强对流天气结束。综上所述,700 hPa高能舌与对流层低层(900 hPa或850 hPa) θ_{sc} 锋区靠近高能一侧的重叠区域与冰雹落区对应较好,700 hPa高能舌说明该区域高温高湿,有较高的潜在不稳定,900 hPa θ_{sc} 锋区则加强了对流层中低层的不稳定能量,同时触发了不稳定能量的释放。

4.2 水汽条件

强对流天气的产生除了需要层结不稳定外,还需要有一定的水汽条件配合,相对于其他表示湿度的要素,比湿可更好地表现出大气的绝对湿度分布。图4

为850 hPa比湿分布图,从图中可以看出,冰雹发生前,南北各有一绝对湿度较大的高湿中心,中心值为10 g/kg。鄂西北冰雹发生前,北部比湿中心向冰雹发生区伸出一狭窄的湿舌,随着高湿区中心的南压,冰雹天气也向南移动,20时左右,神龙架地区正好维持一高湿中心,对应也有冰雹天气发生,16日02时,南压的高湿区与南部的高湿区合并贯通,形成一较宽的湿舌,冰雹区就发生在这条湿舌的一侧。由上可以看出,对流层低层的绝对湿度分布与冰雹发生区对应较好,低层空气的较高水汽含量有利于强对流天气的发生发展。

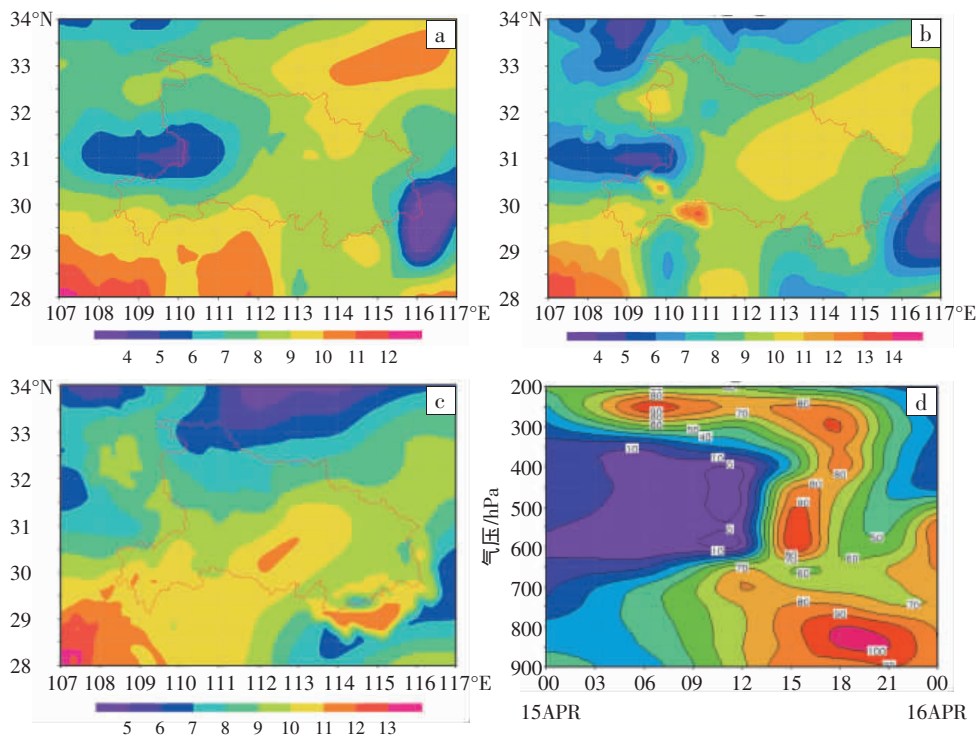


图4 2009年4月15日14时(a)、15日20时(b)、16日02时(c)850 hPa比湿分布图及4月15日08时至16日08时夷陵区比湿高度—时间剖面图(d)(单位:g/kg)

为了进一步说明此次降雹过程中大气的水汽分布演变特征,本文给出了最大直径冰雹产生地夷陵区(111.3°E,30.8°N)的相对湿度高度—时间演变图(图4d)。从图中可看出,冰雹出现前,相对湿度垂直分布主要表现为上干下湿,随着时间的推进,700 hPa以下相对湿度不断增大,对流层中高层维持一个“干盖”,可以抑制低层弱对流的发展,为不稳定能量的积聚创造了有利条件,到15日20时,700 hPa附近出现一个很明显的湿度锋区,能量抑制达到最大,在一定条件触发下,能量释放,转换成强烈的上升运动,产生冰雹。从图中还可以看出,降雹开始,即15日22时左右,对流层中高层相对湿度有一个快速增长的过程,这也就是能量快速释放的过程,15日22时至16日01时,整层湿度都很高,强烈的上升运动将低层高能

高湿空气抬升,形成降雹,到16日01时后,降雹结束,对流层中高层相对湿度又缓慢降低。

4.3 抬升触发条件

前面已经分析了此次强对流天气的不稳定条件和水汽条件,除了这两个因子外,还有一个关键因子,即抬升触发条件。当不稳定能量积蓄到一定程度,若存在外界触发因素,能量得以释放,则易形成强对流天气。

4.3.1 地面温湿场分析

根据国外观测表明,通常对流风暴的能量供应来自厚度约几百米的近地面层空气的相对入流。因而地面温湿场的中尺度特征与强风暴的发展密切相关。

图5为湖北省地面逐时加密观测资料的风场、露点温度与地面总能量叠加场。图5a、b、c分别代表冰雹发生、发展以及消亡三个阶段的各要素演变情况。从

图中可以发现,在冰雹发生前到发生中,神龙架到宜昌地区一直为稳定的高能区,且伴有明显的露点锋,恩施地区地面能量也有弱的增长,说明这个过程是地面总能量积蓄发展的过程,而冰雹发生的后阶段到消亡,高能区迅速缩小,且露点锋也逐渐减弱,说明这个阶段是地面能量释放的过程,对流系统失去能量供

给,系统逐渐减弱消亡。对比冰雹发生的地点与时间,综合图 5a、b、c 信息可以发现冰雹主要出现在高能舌与干线的交界处,且一般比强天气出现早 1~2 h,说明该处不但有能量积蓄,同时存在不稳定因素,当地面冷锋南压,触发地面不稳定能量的释放,提供了强对流天气的入流能量,从而形成强烈的抬升运动。

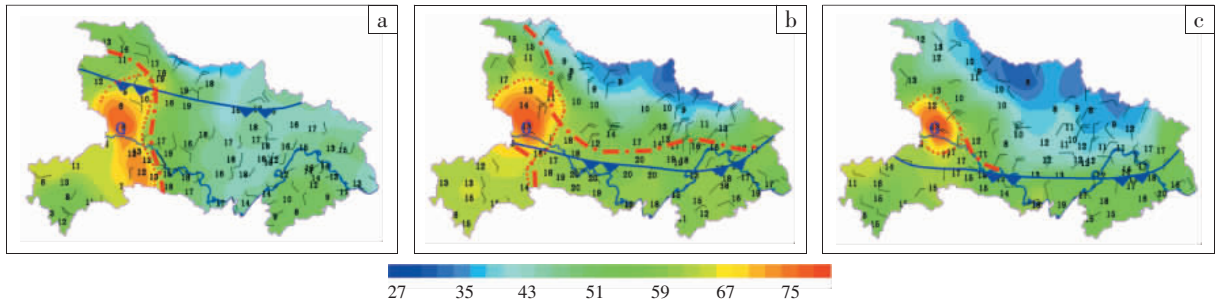


图 5 2009 年 4 月 15 日 16 时(a)、15 日 20 时(b)、15 日 23 时(c)地面加密观测图
(彩色阴影区为地面总能量场,红色点线为高能舌,红色点划线为露点锋,蓝色线为冷锋锋面)

4.3.2 地形抬升作用

湖北省地形分布复杂,西、北、东三面高起,多山地和丘陵,西北为大巴山东部,西南为大娄山和武陵山组成,易产生局地强对流,所以要考虑山脉对气流的抬升作用。

利用高程地形资料数据,计算湖北省各站点的坡度、坡向。地形抬升速度和风速、风向与坡向的夹角及地形坡度有关。 α 表示坡地的坡度, β 和 θ 分别表示向风坡的坡向和降水时的盛行风向, $\sigma=\theta-\beta$ 则表示风向和坡向的夹角。吹向坡面的风速 v 由于受到斜坡阻碍的影响,产生上升运动 ω_1 , ω_1 又在 z 方向即指向天顶

的方向上产生地形抬升速度 ω :

$$\omega = \omega_1 \sin \alpha = \frac{v}{2} \cos \sigma \sin 2\alpha$$

图 6a、b 分别代表此次雹暴发生、发展阶段相应的地形抬升分布情况。图 6a 中地形抬升大值区主要位于鄂西,中心位于房县、鹤峰附近,中心最大值分别为 $-126 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 和 $-142 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 。对比实况,17—19 时,雹暴区主要出现在十堰以及恩施的鹤峰,与地形抬升中心对应很好。图 7b 的大值区主要位于西北到宜昌附近,对比实况,21—22 时,主要雹暴区位于神龙架林区和宜昌地区,实况与大值中心对应也很好。

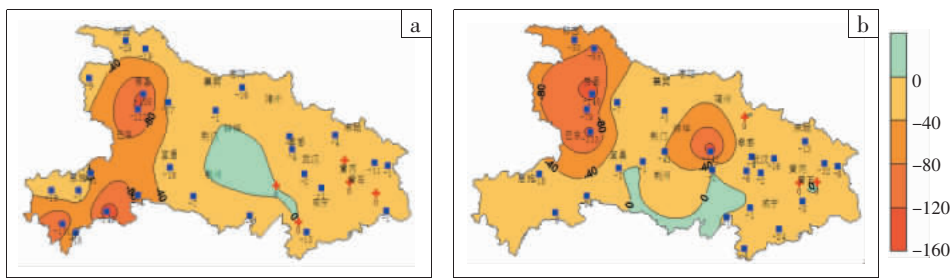


图 6 2009 年 4 月 15 日 17 时(a)、15 日 20 时(b)地形抬升分布图(单位: 10^{-3} m/s)

前文已经分析了地面的温湿场分布,地面锋面和露点锋都会造成系统性的辐合上升运动,在此基础上,加上地形抬升形成的对上升运动的增幅作用,使得鄂西地区对流性天气得以发展。

4.4 垂直风切变

在积云动力学分析研究中,我们知道环境风场特别是低空环境风垂直切变在维持局地强对流风暴方面有着重要的作用^[9],它对对流风暴的类型及其运动和分裂等特性有着重要的影响,决定了对流系统的组织形式;大量外场观测结果也揭示了几乎所有单体或

多单体风暴都发生在有一定风切变的环境这一事实^[7,8]。本文中的垂直风切变是通过地面到 3 km 高度风速矢量差计算出的,图 7 给出了 2009 年 4 月 15 日 17 时、20 时、23 时 0~3 km 垂直风切变分布图。图 7a、b、c 分别代表了冰雹发生、发展、消亡过程中垂直风切变的演变过程。

从图 7a 中可以看出,冰雹发展前期,0~3 km 垂直风切变在十堰以西、宜昌、恩施以东分别出现三个高值中心。15 日 20 时,这三个垂直风切变中心均在加强,尤其是宜昌地区,中心最大值达到 16 m/s,这就为

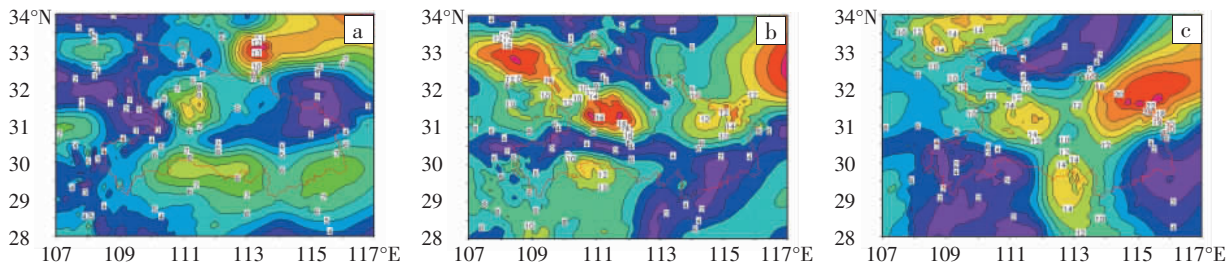


图 7 2009 年 4 月 15 日 17 时(a)、20 时(b)、23 时(c) 0~3 km 垂直风切变图(单位:m/s)

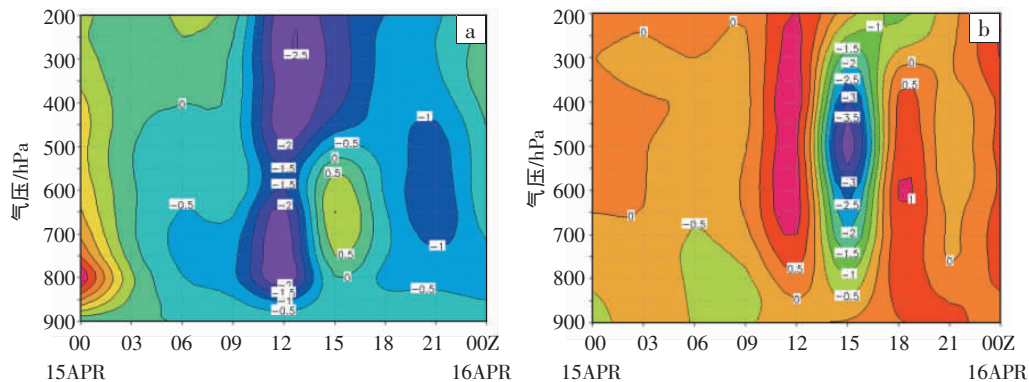


图 8 神龙架(a)、夷陵区(b)垂直上升速度时间演变图(单位:Pa/s)

夷陵区出现 6 cm 冰雹提供了有利的环境风场。随着冰雹的减弱消亡,0~3 km 垂直风切变也减小。从分析可知,0~3 km 垂直风切变对冰雹的产生发展有比较好的指示意义,特别是强冰雹与强垂直风切变的中心对应比较好。对应神龙架和夷陵区两处降雹中心,分别给出相应的垂直上升速度时间演变图(图 8),由图可见,对应鄂西北中心值为 9 m/s 的垂直风切变中心,垂直上升速度中心最大值为 -2 Pa/s ,对应宜昌地区中心值为 16 m/s 的垂直风切变中心,垂直上升速度中心最大值为 -3.5 Pa/s ,这是由于强的垂直风切变能够带来强的斜升气流,从而产生较强的垂直上升运动,垂直上升气流越强,越有利于产生尺寸较大的冰雹。

5 结论

本文从不稳定条件、水汽条件、抬升触发条件三个方面出发,利用高时空分辨率的 LAPS 局地再分析系统资料,综合地面加密自动站信息,对 2009 年 4 月 15 日湖北省西部降雹过程进行了分析,主要得到以下结论:

(1) 冰雹天气一般发生在 500 hPa 有低槽东移,中低层有切变活动,低空有急流发展的大尺度环流背景下。冰雹落区一般位于 500 hPa 温度槽与 850 hPa 温度脊交界处,同时这两层之间会有较大的温度直减率。

(2) 冰雹天气发生时,700 hPa 处于 θ_{sc} 高能区,主要的不稳定能量来源于对流层低层。冰雹主要出现在对流层低层的高能区与 θ_{sc} 锋区交界处。

(3) 冰雹天气发生前,高层存在一稳定的干盖,低

层湿度较大,形成上干下湿的水汽分布状态。水平方向上,冰雹区与对流层低层高比湿中心或湿舌对应较好。

(4) 冰雹天气发生时,地面高能舌提供源源不断的能量补充,同时有锋面或者干线触发能量的释放。冰雹主要出现在地面高能舌与地面干线、锋面的交界处。地形抬升对辐合线及锋面等系统性抬升起到增幅作用。

(5) 垂直风切变能够带来强的斜升气流,冰雹落区与垂直风切变中心对应较好,同时垂直风切变越大,垂直上升气流越强,越有利于产生尺寸较大的冰雹。

参考文献:

- [1] Bosart L F. The Texas coastal rainstorm of 17-21 September-1979, an example of synoptic mesoscale interaction [J]. Mon Wea Rev, 1984,112(6):1108-1133.
- [2] 王笑芳,丁一汇.北京地区强对流天气短时预报方法的研究[J].大气科学,1994,18(2):173-183.
- [3] 刘小红,洪钟祥.北京地区一次特大强风过程边界层结构的研究[J].大气科学,1996,20(2):223-22.
- [4] 葛润生,姜海燕,彭红.北京地区雷暴气流结构的研究[J].应用气象学报,1998,9(1):1-7.
- [5] 陈良栋.雷达对强对流的探测和研究[M].北京:气象出版社,1990.
- [6] 巢纪平,周晓平.积云动力学[M].北京:科学出版社,1964:116
- [7] Browning K A, Foote G B. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression [J]. Q J R Meteorol Soc, 1976, 102:499-533.
- [8] Fan Khauser J C. Thunderstorm environment interactions determined from aircraft and radar observation [J]. Mon Wea Rev, 1971,99:171-192.

Formation Mechanism of a Hail Event in Spring

WANG Xiao-ling, LONG Li-min, WANG Shan-shan

(Wuhan Center Observatory, Wuhan 430074)

Abstract: Based on the unstable conditions, aqueous vapor and elevation trigger conditions, a wide range of hail course on April 15, 2009 in Hubei Province are analysed by using LAPS reanalysis data with high spatial and temporal resolution and ground automatic weather station information. The results show that vertical temperature decline rate increased significantly when upper level has dry cold air and lower level has growing warm moisture, with the lower troposphere's shear which bring dynamic uplift, hail is easy to be formed. The main unstable energy source of hail weather comes from surface to lower troposphere, The surface dry line (dew-point discontinuous line) and frontal surface are the main trigger of energy release. The hail area mainly lies in the coincident area between high altitude and ground's high-energy area, and hail easily happens in the area close to the laterality of dew-point and temperature discontinuous line. The stronger vertical wind shear is favourable to produce hail with bigger size.

Key words: Strong convection; Dry line; frontal surface; Orographic lifting; Vertical wind shear

(上接第 152 页)

Influences of Vacillation of South Asia High on the Event of Extreme Rainfall of Hubei Province

WANG Deng-yan¹, ZHOU Xiao-lan², LIU Jing²

(1. Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074;

2. Meteorological Science and Technology Service Center of Hubei Province, Wuhan 430074)

Abstract: In this paper, the events of extreme rainfall including 14 cases with rainfall ≥ 200 mm per 24 hours and rainfall ≥ 300 mm per 48 hours are studied. It shows that the extreme rainfall are closely related with the east-westly vacillation of South Asia High. When South Asia High stopped above Qinghai-Xizang Plateau, southwest jet of low level translated the water-vapour from the Bay of Bengal to the Plateau, and the vortex cloud system are formed when westly trough of the plateau joins the water vapor from the Bay of Bengal. The vortex cloud system was a deeply mesoscale system corresponding with low vortex and shear line on 500hPa and showing anticyclone near the axis of ridge of South Asia High on 100-200hPa. When the South Asia High moves toward east, the water vapor from the Bay of Bengal also moved eastly. The extreme rainfall event occurs if it meets suitable environmental field. If South Asia High moves toward east, the great divergence field of the center of South Asia High coordinated by the severe convergence of lower level concentrates the water vapor on a point and triggers the extreme rainfall. If South Asia High partly moves eastly, the mesoscale anticyclone near the axis of ridge of South Asia High moves eastly and triggers mesoscale convective system forming extreme rainfall. If typhoon landed, the divergence of South Asia High makes typhoon maintaining for a considerable long time, and extreme rainfall happens.

Key words: South Asia High; East-westly vacillation; Excessive rainfall event