

一次产生强冰雹天气的弱降水超级单体风暴分析

张炳川^{1,2}, 袁淑杰¹, 韩江文², 苏航²

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 辽宁省气象台, 辽宁 沈阳 110166)

摘要:弱降水超级单体风暴有着不同的雷达回波特征,在实际预报业务中不易识别。基于探空、FY2E 卫星云图和多普勒天气雷达等观测资料,对2011年8月21日傍晚发生在沈阳的伴有强冰雹的弱降水超级单体风暴的环境背景条件和雷达回波演变特征进行了详细分析。结果表明:此次天气过程发生在东北冷涡的环流背景下,过程前有利的热力与动力配置使得强对流发生的潜势非常明显,低层切变线和干线南压触发了不稳定能量释放。红外云图上,对流云团加强形成了一个中尺度对流系统,强对流天气出现在云团南部边缘。低层湿度相对较低,自由对流高度较高,有利于形成弱降水超级单体风暴;雷达回波分析可以看出,弱降水超级单体风暴悬垂特征不明显。垂直累积液态水含量密度是判别大冰雹生成的实用指标。

关键词:气象学;强对流预报;弱降水超级单体;中气旋;对流有效位能;多普勒天气雷达

0 引言

夏季是辽宁地区强对流天气的多发季节,而超级单体是对流发展最猛烈的形式,深厚持久的中气旋是超级单体风暴区别于普通风暴的主要特征^[1]。超级单体概念由 Browning^[2] 在1962年首先提出, Lemon等^[3] 1979年在多普勒天气雷达观测事实基础上提出了新的超级单体概念模型,并沿用至今。随着对更多观测个例的研究^[4] 和数值模拟^[5-7],证明了超级单体风暴总是伴有中气旋出现,根据风暴特性的不同,气象学家又将超级单体风暴分为经典超级单体风暴、强降水超级单体风暴和弱降水超级单体风暴^[8]。弱降水超级单体风暴一般反射率因子较低,主要灾害为大冰雹。与经典或强降水超级单体风暴相比较,弱降水超级单体风暴在雷达观测产品上不具有明显的钩状或指状及“V”型槽口特征^[9-10],且中气旋位于强回波区之外,因此在实际业务工作中难以识别。2011年8月21日傍晚,辽宁中部地区出现强对流天气过程,开始阶段弱降水超级单体风暴自南向北扫过沈阳,移动了40 km左右,历时1.5 h,在沈阳市区产生雷电大风伴随大冰雹天气,最大冰雹尺寸达到5 cm左右(鸡蛋大小);后期又有一个对流风暴自西向东影响沈阳,在沈阳地区产生短时强雷雨天气,21日18~21时3小时内沈阳市有8个自动站降水量达到50 mm以上,最大降水量达到73.9 mm,几乎覆盖整个沈阳市区,造成比较严重的雹灾和城市内涝。近年对经典和强降水超级

单体风暴个例分析研究较多^[11-12],侧重于分析本次过程中产生大冰雹的罕见的弱降水超级单体风暴。

1 天气环流背景

东北冷涡是辽宁地区产生强对流天气的主要天气背景。2011年8月21日08时500 hPa冷涡中心位于黑龙江中部(图略),辽宁位于东北冷涡底部,涡后西北气流不断引导冷空气南下,辽宁上空冷平流明显。850 hPa有一条准东西向的冷切变缓慢南压,辽宁位于切变南侧。图1给出21日08时500 hPa和850 hPa系统综合配置图,500 hPa西北急流位于吉林中部,辽宁地区处于急流轴的右侧,温度槽自北向南伸展到辽宁地区,内蒙古东部有温度露点差大于20℃的干舌沿西北气流向辽宁地区扩展。850 hPa高空切变位于内蒙古东部到吉林中部一带,在辽宁西北部有一条东北西南向的干线,此时辽宁地区受反气旋环流影响,天气晴好,加上21日早晨辽宁中部以北地区已经出现过小雨天气,有利于低层大气增温增湿和不稳定能量的积累;同时温度脊自内蒙古东部伸展到辽宁中部,湿舌则自朝鲜半岛向西北伸展到辽宁中部,辽宁中部是相对的高温高湿区。另外在700 hPa辽宁上空同样为西北气流控制(图略),辽宁北部地区温度露点差小于3度,可以看出湿层比较深厚,并且700 hPa与500 hPa温差大于18℃区自内蒙古东部向辽宁地区伸展,这种高空不稳定层东扩使辽宁上空层结进一步向不稳定方向发展。综合分析可以看到,辽宁上空上层干冷下层暖湿,辽宁中部地区大气层结极度不稳定,并且有切变和干线配合,为冰雹的发生发展提供了很好的大尺度环流

背景。根据移动速度预测,切变线将在21日午后到夜间到达辽宁中部地区,而午后到傍晚正是强对流易发时段,预示21日午后辽宁出现强对流天气的可能性较大。

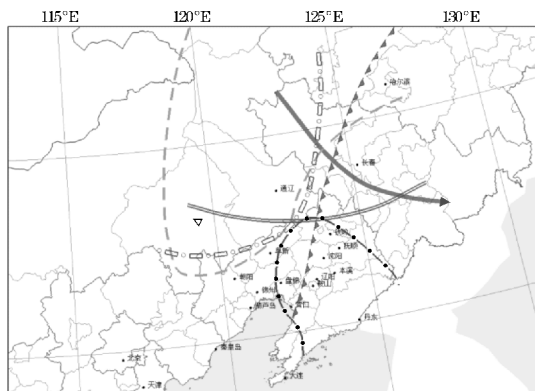


图1 2011年8月21日08时系统综合配置图(三角虚线:500 hPa温度槽线;实线:500 hPa急流轴;虚线:500 hPa温度露点差大于20℃干区;双实线:850 hPa切变线;点划线:850 hPa干线;点线:850 hPa>16℃湿区)

2 探空曲线(T-lnp)分析

21日08时,沈阳T-lnp图上(图略),低空(700 hPa以下)风向随高度顺时针旋转,伴有暖平流,700 hPa以上风向随高度逆时针旋转,有冷平流,这种平流的垂直分布使得辽宁上空大气层结不稳定性增加。925 hPa附近逆温层的存在有利于低层能量的积累。大湿度区位于700 hPa以上、500 hPa以下,500 hPa以上(包括500 hPa)湿度非常低,700 hPa以下湿度也相对较低。另外08时沈阳上空的对流有效位能CAPE值达到了1245.4 J/Kg,呈现较大的垂直不稳定特征,强对流发生的潜势非常强。由于对流抑制有效位能(CIN)也不算小(261.5 J/kg),自由对流高度LFC接近700 hPa,因此需要较强的抬升触发,此时切变和干线距沈阳还比较远,产生雷暴天气三要素(静力稳定度、水汽和触发机制)中还缺少触发条件。经过21日白天日照及地面水汽蒸发,低空增温增湿,对流抑制削弱,当干线南压到沈阳地区时,雷暴发生发展的条件将完全具备,触发不稳定能量释放,产生强对流天气。

21日20时的T-lnp图(图略)上可以看到一些环境要素发生显著变化,自由对流高度降到850 hPa以下、抬升凝结高度降到925 hPa以下,非常有利于对流尺度触发;对流有效位能降低但仍比较大,对流抑制明显减小,特别是整层相对湿度较大、低层西南急流增强。此时的环境条件有利于产生短时强降水^[13],不易出现冰雹,因此本次过程后期以强雷雨天气为主。

3 卫星云图分析

卫星红外云图上(图2),21日15时辽宁西北部零散分布一些 γ 中尺度的对流云块,16时这些小对流云块迅速合并加强为3个对流云团。18时西部云团开始减弱,这与西部地区低层水汽条件较差有一定关系。19时中部云团和东部云团合并加强为东西长近200 km、南北长宽150 km的椭圆形的中尺度对流系统(MCS),云顶亮温达到-53度,强天气出现在MCS的南部边缘。21时后云团减弱东移,21日24时云团减弱消散。此次MCS自19时开始生成、发展,至24时减弱消散,持续时间仅5个小时。

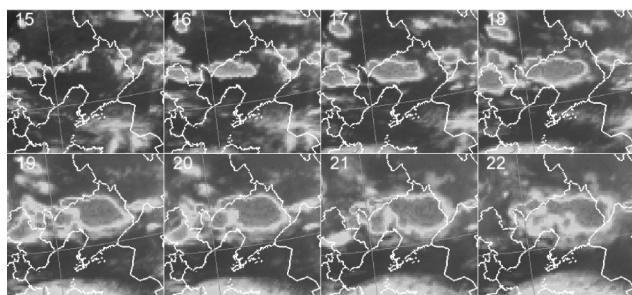


图2 2011年8月21日15时~22时卫星红外云图

4 多普勒天气雷达产品分析

4.1 风暴演变

21日午后辽宁中部地区开始出现零散的对流回波(图3),17时49分在沈阳和抚顺之间有2个对流单体风暴(A、B)迅速加强,17时59分A风暴单体中心回波强度达到50 dBZ,并呈现明显扇形特征,此时A风暴对应区域出现弱冰雹天气。18时10分A、B两风暴开始减弱,同时在“A”风暴的西侧约10 km处有新的风暴C生成。18时20分C、A两风暴结合,C风暴快速加强,而A风暴则快速减弱,18时40分至18时50分C风暴达到最强时段,风暴中心回波强度达到55 dBZ,并且同样具有明显的扇形特征,而A风暴则完全被C风暴所取代,此时C风暴在沈阳南部地区产生强冰雹天气,5 cm左右的强冰雹即出现在此时C风暴对应的位置,之后C风暴强度逐渐减弱,并缓慢向东北方向移动,扫过沈阳市区,在沈阳市区产生较强的冰雹天气。在C风暴东北移动同时,C风暴移动方向的后侧又有多个对流风暴生成发展,但强度都不强,在沈阳南部地区产生局地短时暴雨天气。19时47分C风暴移出沈阳到达抚顺,强度进一步减弱,同时对流风暴回波D自西向东移动到沈阳,给沈阳市区带来短时强降水天气。

4.2 风暴结构分析

这次过程前期(21日20时之前)天气以强冰雹为主,降水不强,符合弱降水超级单体风暴的天气特征。俞小鼎^[14]认为出现弱降水超级单体风暴的环境低层具有较低的湿度和较高的自由对流高度,几乎所有的弱降水超级单体风暴都出现在干线(露点锋)附近,根据21日08时环流背景及探空曲线分析,21日天气背景形势具备弱降水超级单体风暴发生发展的条件。

21日风暴最强时段出现在18时40分至19时,大冰雹就出现于此期间。从18时50分沈阳雷达产品图(图4)可以看到,沈阳雷达0.5°反射率因子图上(图4a),回波主体位于沈阳市区南部,回波形状具有明显的扇形尾部特征,风暴中心位于扇形的顶部(指向西北方向),风暴强中心对应高度为0.6 km强度达到55 dBZ;对应时刻速度图上,中气旋特征在3.4°仰角(对应高度为

2 km)上开始出现(图4b 白圈处),气旋中心位于沈阳西北方向,距回波强度中心6 km左右,核区直径为5 km左右,旋转速度达到22 m/s,根据中气旋强度划分标准属于中等强度的中气旋;在6°仰角(对应高度为3 km)上同一位置中气旋特征仍显著(图4c 白圈处);沿图4(a)上做反射率因子剖面图可以看到(图4d),大于50 dBZ的强回波向上伸展到10 km高度上,强回波随高度向西北方向(中气旋所在方向)倾斜,并在7 km高度上产生回波悬垂(图4d 箭头所指处),但悬垂结构特征不明显,悬垂下面为弱回波区;营口雷达0.5°、1.5°、2.4°及3.4°(风暴强中心分别对应高度为3 km、5.8 km、8.2 km、11 km)回波形状以椭圆为主(图5),强中心位置随高度增加略向西北方向倾斜,而这个方向正是中气旋所在的位置。从回波强中心的垂直分布看,风暴强中心回波强度在3 km高度上达到最强,强度达到65 dBZ,向上、向下回波强度逐渐减弱。

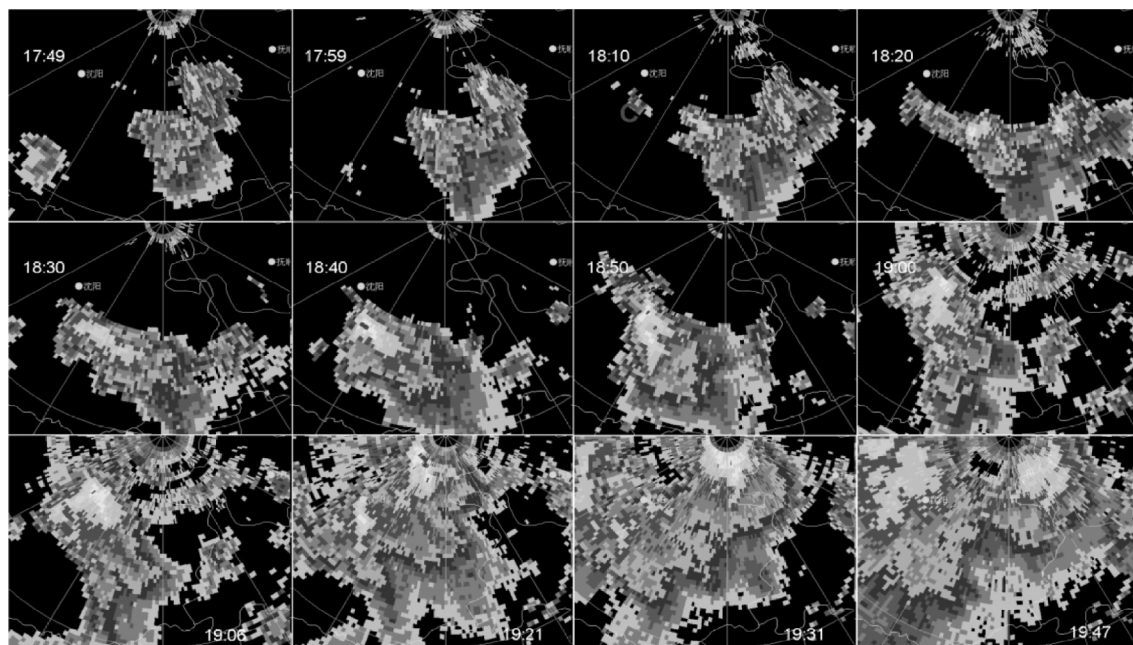


图3 2011年8月21日沈阳雷达反射率因子时间演变图

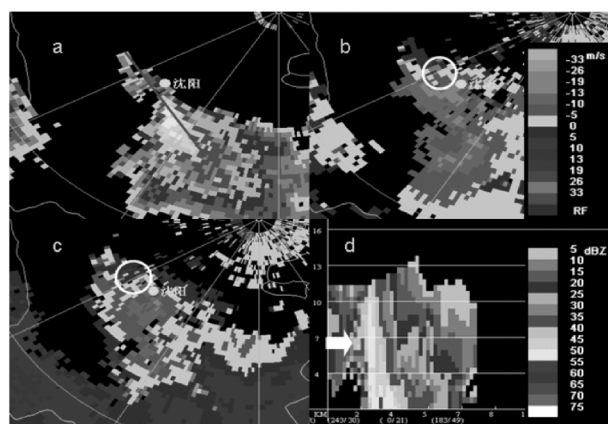


图4 2011年8月21日18时50分沈阳雷达产品图

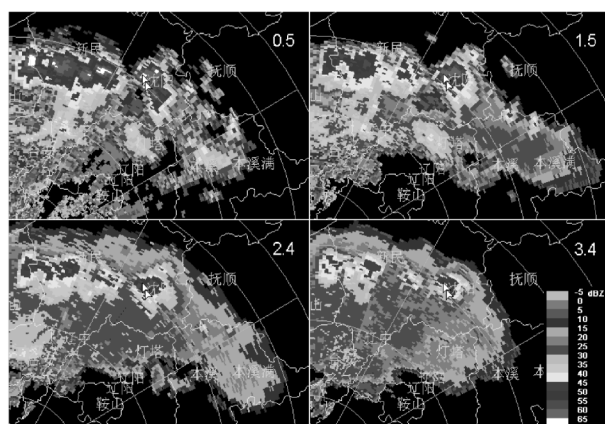


图5 2011年8月21日18时50分营口雷达反射率因子图

分析相同时刻、同仰角营口雷达径向速度产品可以看出,在风暴强中心西北方向约5 km处有一个很强的气旋式切变速度对(图6a白圈处),与沈阳雷达观测到的中气旋位于同一位置,风场特征为气旋式辐合旋转,该中气旋旋转速度达到18 m/s,仍属于中等强度的中气旋。在5.8 km、8.2 km高度上(图6b、图6c白圈处)为气旋式辐散旋转,11 km高度上(图6d)速度产品上呈现出强纯辐散,正负速度差达到40 m/s。上述风暴的速度特征基本符合成熟中气旋概念模型。

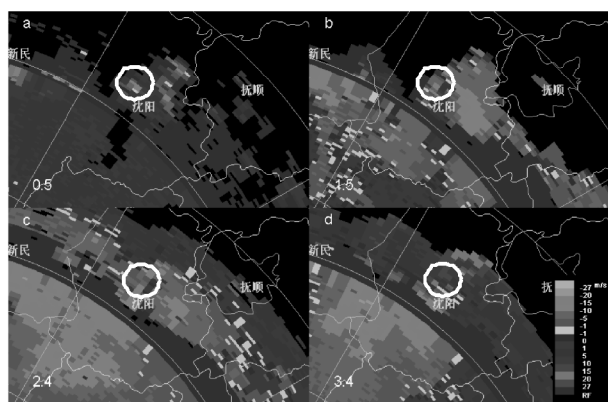


图6 2011年8月21日18时50分营口雷达径向速度图

上述分析表明,此次风暴的反射率因子强中心与中气旋并不在同一位置,中气旋位于回波强中心上游约5~6 km处,中气旋直径小于10 km,垂直尺度达到5 km以上;强回波随高度向中气旋方向倾斜,并在7 km高度上形成弱悬垂结构。这种配置符合弱降水超级单体风暴反射率因子配置模型,表明此次降雹过程的影响系统为弱降水超级单体风暴。

另外,可以根据强回波区相对于0℃、-20℃等温线高度的位置来判断有无大冰雹^[14],当50 dBZ回波高度超过-20℃等温线高度时,出现大冰雹的可能性极大。从18时50分沈阳雷达回波剖面图上可以看到(图4d),强回波达到10 km,而08时沈阳-20℃的高度为7 km,强回波高度符合冰雹云特征,有利于大冰雹的形成。

4.3 垂直累积液态水含量及其密度特征

垂直累积液态水含量(VIL)是一个判别冰雹与强降水的重要参量,其定义为液态水混合比的垂直积分,液态水混合比是通过雷达反射率因子与雨滴之间的经验关系进行计算的。根据对辽宁地区历史强对流天气的统计,将判别冰雹与短时强降水的VIL阈值定为35 kg/m²,当VIL超过35 kg/m²时出现冰雹天气的可能性较大。

对于此次过程(图7),17时24分左右VIL值超过冰雹预报阈值,在18时12分开始迅速增加,18时42分达到最大值68 kg/m²,此时也是风暴发展到最强

阶段,此后VIL值呈波动式下降,20时以后VIL值降到阈值以下,从实际观测结果看,沈阳在18时22分左右开始出现大冰雹,20时前后由冰雹天气转为后面东移对流风暴所带来的短时强降水天气。而在17时24分至18时22分,VIL值同样超过冰雹预报阈值,在此期间观测到的冰雹强度较弱;当VIL值迅速增大、大冰雹出现时,风暴移到沈阳市区的南部,造成的影响也非常严重。

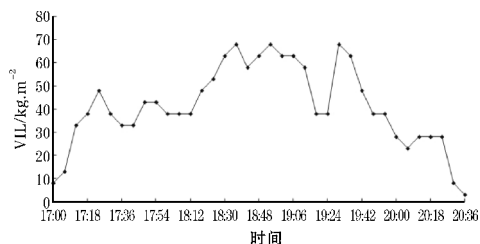


图7 2011年8月21日VIL时间演变图

使用固定的VIL阈值作为冰雹判别指标还存在一些问题,Amburn等^[15]将VIL与风暴顶高度之比定义为VIL密度来改进这些问题。针对美国强对流天气个例的研究表明,如果VIL密度超过4 g/m³,则风暴极可能产生直径超过2 cm的大冰雹。分析本次过程VIL变化,18时22分至19时12分,VIL密度在4.07~4.8 g/m³,风暴所经之处普遍出现了直径超过2 cm的大冰雹;之后VIL密度短暂减弱,19时30分再次达到4 g/m³以上,此时在沈阳市区的西北部再次出现强冰雹。在17时24分至18时22分,VIL密度在2.9~3.7 g/m³,出现的冰雹尺寸小于2 cm。说明Amburn所给出的VIL密度指标是适用于这次过程的。

5 结束语

(1) 此次天气过程发生在东北冷涡的环流背景下,高空冷涡后部干冷空气叠加在低层暖湿空气上,增加了层结的不稳定性;850 hPa切变线和干线是本次过程的触发系统。

(2) 21日08时沈阳T-lnp图上,低空暖平流、中高空冷平流使得辽宁上空大气层结不稳定性增加;925 hPa附近的逆温层有利于低层能量的积累,较高的CAPE值表明强对流发生的潜势非常强。中层湿度大,高、低层湿度相对较低,自由对流高度较高,有利于形成弱降水超级单体风暴。红外云图上,对流云团加强形成了一个持续5小时MCS,强对流天气出现在MCS云团南部边缘。

(3) 雷达回波分析可以看出,超级单体风暴垂直结构特征辐合弱降水超级单体风暴模型,表明此次降雹过程的影响系统为弱降水超级单体风暴。弱降水超级单体风暴由于水汽条件较差,其悬垂特征不明显,使

得风暴反射率因子在垂直方向上倾斜特征不明显。

(4) VIL 是判别强对流发生种类比较实用的指标,本次过程中 VIL 变化与冰雹发生时间上相对应;VIL 密度指标对判别冰雹强度有一定的参考作用,这方面还需要更多的个例研究。50 dBZ 强回波区相对于 0℃、-20℃ 等温线高度的位置,也可作为判断有无大冰雹产生的依据。

参考文献:

- [1] Browning K A. The structure and mechanisms of hailstorms[J]. Amer. Meteor. Soc. Monog., 1978, 38:1-36.
- [2] Browning K A. Cellular structures of convective storms[J]. Meteor. Mag., 1962, 91:341-350.
- [3] Lemon R L, Doswell C A. Severe Thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis[J]. Mon. Wea. Rev., 1979, 107(9):1184-1197.
- [4] Ray P S, Doviak R J, Walker G B, et al. Dual-Doppler observation of a tornadic storm[J]. J. Appl. Meteor., 1975, 14(8):1521-1530.
- [5] Klemp J B, Wilhelmson R B, Ray P S. Observed and numerically simulated structure of a mature supercell thunderstorm[J]. J. Atmos. Sci., 1981, 38:1558-1580.
- [6] Rotunno R, Klemp J B. The influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion[J]. Mon. Wea. Rev., 1982, 110(2):136-151.
- [7] Rotunno R, Klemp J B. On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms[J]. J. Atmos. Sci., 1985, 42(3):271-292.
- [8] Moller A R, Doswell C A, Foster M P, et al. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures[J]. Wea. Forecasting, 1994, 9(3):327-347.
- [9] 王昂生,徐乃璋. 强单体雹暴的研究[J]. 大气科学, 1985, 9(3):260-267.
- [10] 郑媛媛,俞小鼎. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J]. 气象学报, 2004, 62(3):317-328.
- [11] 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J]. 大气科学, 2008, 32(3):508-522.
- [12] 牛淑贞. 典型超级单体风暴过程分析[J]. 气象, 1999, 25(12):32-47.
- [13] 俞小鼎. 短时强降水临近预报的思路与方法

[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(3):202-209.

- [14] 俞小鼎,姚秀萍,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, 2006:109-116, 145-150.
- [15] Amburn S A, Wolf P L. VIL density as a hail indicator[J]. Wea. Forecasting, 1997, 12:473-78.