

Analysis of the Process of Strong Convective Weather in the Background of Cold Vortex in Qingdao

Mingxiao Gong¹, Yan Ma², Hua Li¹

¹Jimo Weather Bureau, Qingdao Shandong

²Qingdao Weather Bureau, Qingdao Shandong

Email: 52661460@qq.com

Received: Oct. 3rd, 2019; accepted: Oct. 18th, 2019; published: Oct. 25th, 2019

Abstract

The data of Doppler weather radar and FY-2F geostationary satellites, FNL and ECMWF reanalysis data are used to analyze the strong convective weather process in the background of a cold vortex in Shandong. The strong vertical airflow before the deep cold vortex, the strong vertical wind shear caused by the high-level jet and the ground convergence line provide a very favorable condition for the strong convective weather. Radar echo can also be found on the echo overhanging, bounded weak echo area, the cyclone, into the gap and other signs of strong storm echo characteristics; marking the strong convection development is very strong. Black-Body Temperature (TBB) has a good guiding significance for short-term heavy precipitation. The TBB gradient large area corresponds to the large precipitation site, and the heavy rainfall usually occurs after the TBB suddenly drops, and the precipitation stops after TBB rises.

Keywords

Cold Vortex, Strong Convection, Black-Body Temperature

青岛地区一次冷涡槽前强对流天气过程分析

宫明晓¹, 马艳², 李华¹

¹青岛市即墨区气象局, 山东 青岛

²青岛市气象局, 山东 青岛

Email: 52661460@qq.com

收稿日期: 2019年10月3日; 录用日期: 2019年10月18日; 发布日期: 2019年10月25日

摘要

利用多普勒天气雷达、FNL、ECMWF及FY-2F静止卫星等数据,对发生在山东的一次冷涡背景下的短时强降水伴随冰雹的强对流天气过程进行了详细的分析。深厚冷涡槽前的强上升气流,高层急流造成的强垂直风切变以及地面辐合线配合为此次强对流天气提供了十分有利的动力条件。雷达上可见回波悬垂,有界弱回波区,中气旋,入流缺口等指示强风暴的特征,标志此次强对流发展十分旺盛,有利于强降水及冰雹的发生。另外卫星云顶黑体亮温(TBB)对短时强降水有很好的指示意义,降水量与TBB成很好的负相关关系,同时TBB梯度大值区对应降水大值站点,强降水出现在TBB突降之后,TBB突升之后降水趋于停止。

关键词

冷涡,强对流,云顶黑体亮温

Copyright © 2019 by author(s) 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

1. 引言

高空冷涡是引起山东等华北地区强对流天气的主要影响系统之一。研究[1]-[6]表明,冷涡强对流天气一般发生在冷涡外围东南或者西南象限,且常伴有大风、冰雹、短时强降水等天气。近年来,学者们对冷涡产生的强对流天气进行了大量的研究。郑媛媛等[1]对安徽省不同类型的大尺度环流背景下强对流的预报进行了研究和总结,分析了冷涡槽后型和冷涡槽前型强对流发生的大尺度环境背景特征,建立了冷涡槽后和槽前型强对流概念模型,对安徽地区的强对流预报起到一定的参考价值,同时冷涡背景下的强对流也是山东地区强对流的一种常见形势,因而对山东地区强对流的预报预警也有一定的指示意义。曹钢锋[2]在对高空冷涡结构的研究中发现,冷涡东南象限为正涡度的大值区,伴随明显的冷平流,更容易产生强对流天气。近年来随着多普勒天气雷达、气象卫星、风廓线仪等探测手段的快速发展和不断更新,在强对流的短时预报和监测预警上起到了重要作用,有效地提高了短临时段的预报预警能力。蓝渝等[3]利用FY-2E静止卫星资料分析了华北地区27个冰雹强天气个例,对华北地区的冰雹天气过程进行系统地分型和云系特征总结,统计了冰雹发生时刻对流亮温的特征,为华北地区的冰雹预报预警提供参考。另外,董海鹰等[4]、李云静等[5]、王兆华等[6]利用雷达、卫星等资料对冷涡背景下的强对流天气进行了分析,可以看出雷达、卫星及风廓线等资料对强对流的短临预报有很好的指示作用。

2016年6月14日下午到夜间山东出现了一次大范围雷雨大风天气,鲁西北的大部和鲁中、鲁南和半岛部分地区出现短时强降水,雷雨时阵风8~9级,部分地区伴有冰雹,冰雹直径达20mm。根据山东省民政厅统计,灾情涉及全省8个市、35个县(市、区)的143个乡镇,受灾人口54.89万人。农作物受灾面积41.6千公顷,倒塌房屋5间,严重损坏房屋15间,一般损坏房屋777间。这场灾害造成的直接经济损失已达3.99亿元。此次过程瞬时极大风速为25.3m/s,出现在潍坊青州王坟镇。最大小时雨强为65.6mm出现在潍坊红沙沟,出现在18~19时(北京时,下同)。其中青岛地区的强对流主要发生在20~22时,青岛市区、黄岛区、崂山区、城阳区、即墨市、胶州市发生大面积的短时强降水,胶州铺集镇出现暴雨和冰雹,最大雨强出现在铺集镇20~21时,小时雨强达到62.7mm。

此次过程是发生在冷涡槽前的一次强对流天气，本文利用 FNL、ECMWF 资料，重点分析冷涡背景下大尺度环流系统对此次中尺度对流的影响，并利用雷达、卫星等非常规资料对强对流天气的发展过程进行详细剖析。

2. 天气形势分析

由天气形势(图 1)看出，14 日 08 时 500 hPa 华北地区受冷涡控制，深厚的低涡一直伸展到 850 hPa。到 20 时山东仍处于高空冷涡槽前，500 hPa、700 hPa、850 hPa 三层槽线位置几乎重合，有利于对流上升运动的发展。高层 200 hPa 上存在急流，急流中心风速达到 56 m/s，上下层存在强烈的垂直风切变。同时 20 时 500 hPa 山东处于冷槽控制，而下层则为暖脊控制，中层干冷空气入侵，有利于对流发展。地面上，向东南移动的黄河气旋不断加深，20 时，中心位于山东、江苏、安徽三省交界处。一条西南-东北向中尺度辐合线横穿整个山东省，与高空急流形成低空辐合高空辐散的配置，有利于上升运动的发展。23 时，倒槽移到青岛以南海上。此时的高空形势是典型的高空冷涡槽前类强对流环境流场配置，符合郑暖暖等[1]和蓝渝等[2]提出的冷涡槽前型强对流概念模型，即高空存在深厚的低涡结构，高层存在急流，中层冷槽控制，低层槽前暖脊发展，形成自南向北的暖湿平流，并伴有地面辐合线发展。深厚低槽前部的上升气流为强对流的发展提供了有利的条件，同时中层干冷空气的影响，会形成强的不稳定层结，有利于对流系统的发展加强和维持。

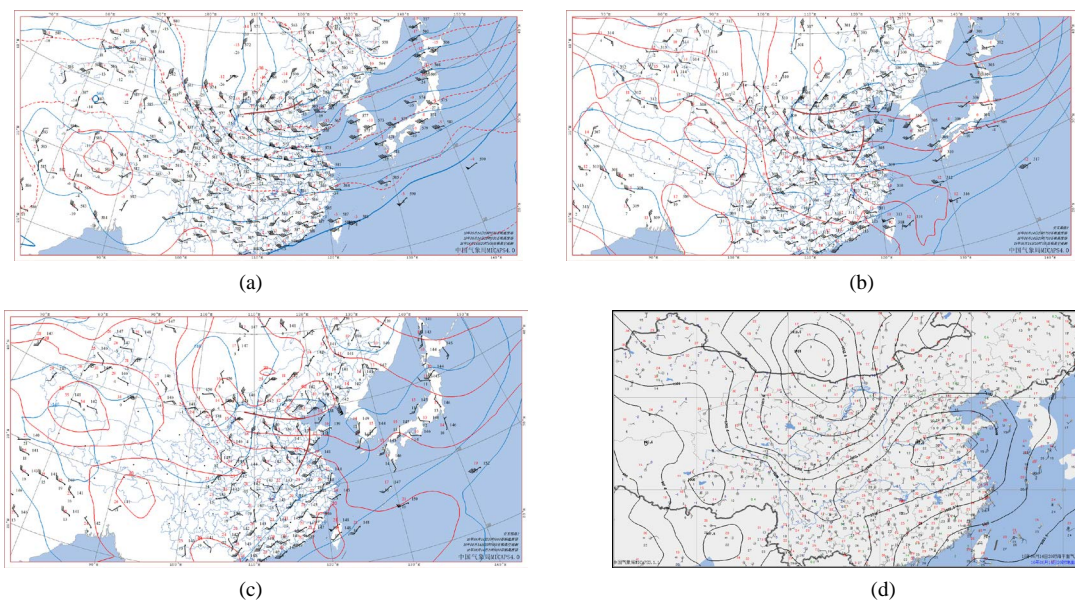


Figure 1. Analysis of the high-altitude and ground conditions at 20:00 on June 14, 2016 (a. 500 hPa, b. 700 hPa, c. 850 hPa, d. surface)

图 1. 2016 年 6 月 14 日 20 时高空和地面天气图(a. 500 hPa, b. 700 hPa, c. 850 hPa, d. 地面)

3. 强对流天气条件分析

3.1. 水汽条件

通过 2016 年 6 月 14 日下午 925 hPa 水汽通量散度变化可以看出，14 时(图 2(a))山东地区主要受西南风控制，在山东与河北交界处存在一个中心为 $-0.7 \times 10^{-6} \text{ g/m}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}$ 的水汽辐合区。到 20 时(图 2(b))西南风不断增强，辐合线南压，山东东南部风速辐合不断增强。水汽在山东东南部地区不断积累，形成了一个 $-1.2 \times 10^{-6} \text{ g/m}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}$ 的水汽辐合大值中心。可以看出从 14 时到 20 时受低层辐合线的影响，水汽不断在山东东南部沿海地区聚集，为强对流天气短时强降水等的发生发展提供了有利的水汽条件。

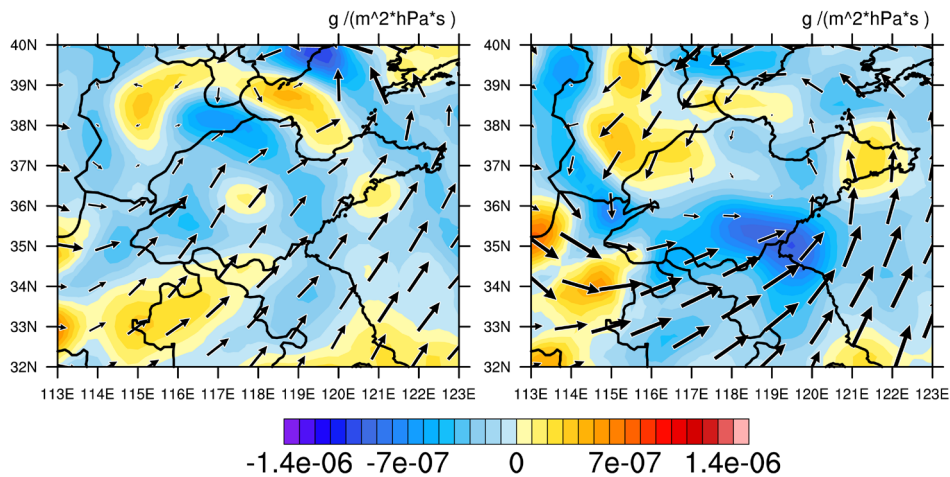


Figure 2. Water vapor flux divergence and wind on 925 hPa at 14:00 (a) and 20:00 (b) on June 14, 2016
图 2. 2016 年 6 月 14 日 14 时(a)和 20 时(b) 925 hPa 水汽通量散度和风场

3.2. 垂直运动条件

从垂直速度和相对湿度纬向剖面图上可以看出，从下午 14 时(图 3(a))开始沿 36.5°N (胶州附近)经向上为明显的上干下湿结构，14 时垂直速度中心区位于 118°E，垂直速度中心在 500 hPa 附近，中心值达到 -0.6 m/s，此时青岛地区(120°E 左右)低层有弱的上升运动，700 hPa 以上为下沉运动。20 时(图 3(b))，山东地区的垂直上升运动强烈发展，从 118~124°E 整层皆为垂直上升运动，上升速度中心东移到 122°E 上空 500 hPa 处，最大上升速度达到 -1.2 m/s，剧烈的上升运动导致了强对流发生。并且到 20 时，低层相对湿度明显比 14 时有所增强，14 时低层相对湿度主要在 90% 以下，大于 90% 的区域主要集中在 121°E 以东，而到 20 时 700 hPa 以下绝大部分地区相对湿度都超过 80%，并且在 120°E 附近大片区域相对湿度达到 90% 以上，中心值高达 100%，水汽主要集中在 700 hPa 以下，上干下湿的水汽分布有利于强降水等强对流天气的发生。

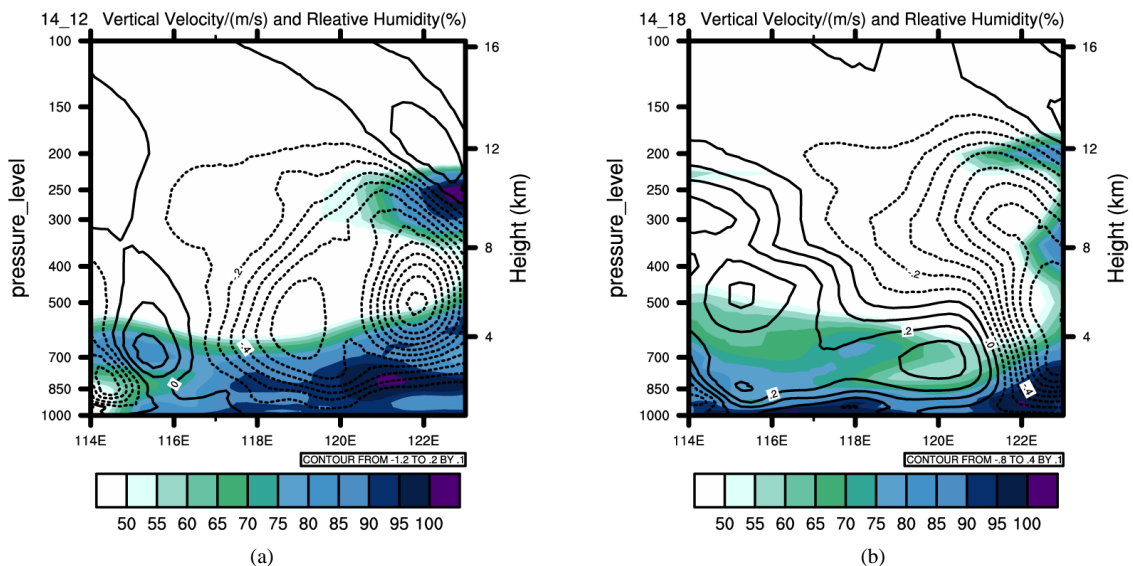


Figure 3. Longitudinal velocities (contours) and relative humidity (filled maps) at 14:00 (a) and 20:00 (b) 36.5°N on June 14, 2016
图 3. 2016 年 6 月 14 日 14 时(a)和 20 时(b) 36.5°N 的垂直速度(等值线)和相对湿度(填色图)的经向剖面图

3.3. 大气层结条件

分析 14 日 08 时章丘探空图(图 4(a))可以看出, 08 时 cape 值为 52 J/kg 能量已开始积累, 从风的垂直分布看, 850 hPa 以下为西南风, 700 hPa 转为西北风, 400 hPa 又逆转为偏西风, 表明低层有暖平流, 高层有冷平流。形成上暖下冷的不稳定结构, 且风速垂直切变较大, 湿层较厚, 这些都有利于对流的发生和发展加强。从青岛探空图看, 08 时(图略)和 20 时(图 4(b))对流层高层西南风都很大, 低层风向随高度顺时针旋转, 有暖平流, 同时 500 hPa 有干冷空气入侵, 有利于不稳定层结的形成和加强。从表 1 中可以看出 08 时到 20 时 K 指数由 26℃ 增至 35℃, SI 指数由 4.54℃ 降到 -5.21℃, 850 hPa 和 500 hPa 温差升到 30℃, 可见青岛上空对流不稳定能量迅速发展和积累。同时 20 时青岛上空低层为东南风, 850 hPa 转为西南风, 随着高度升高, 风向逐渐顺时针旋转, 而 500 hPa 高度处风向接近西风, 风向顺时针旋转了将近 90°。并且风速也由低层的 10 m/s 增加到 20 m/s。再往上风速继续增大, 到 200 hPa 风速增至 48 m/s。20 时青岛地区 0~3 km 垂直风切变由 08 时的 12.3 s⁻¹ 增至 19.2 s⁻¹, 0~6 km 垂直风切变由 08 时的 18.5 s⁻¹ 增至 25.2 s⁻¹, 强烈的垂直风切变及不稳定能量的不断累积对强降水和冰雹等强对流天气的发生十分有利。

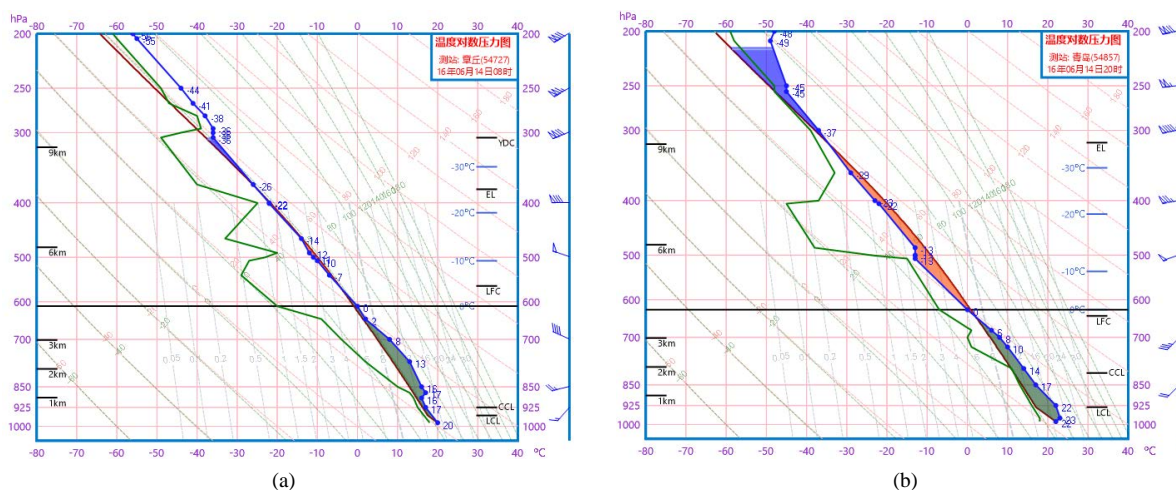


Figure 4. Qingdao Station (54857) sounding data map at 08:00 (a) and 20:00 (b) on June 14, 2016

图 4. 2016 年 6 月 14 日 08 时章丘站(54727) (a)和 20 时青岛站(54857) (b)探空资料图

Table 1. Atmospheric stability index at 14:00 (a) and 20:00 (b) 36.5°N on June 14, 2016

表 1. 2016 年 6 月 14 日 08 时和 20 时青岛站(54857)大气稳定度指数

时间	SI/℃	K/℃	CAPE/(J/kg)	T ₈₅₀ -T ₅₀₀ /℃	0~3 km 风切变 m/s	0~6 km 风切变 m/s
08 时	4.54	26	0	26	12.3	18.5
20 时	-5.21	35	441.6	30	19.2	25.2

4. 雷达探测分析

2016 年 6 月 14 日下午 15 时在山东济阳境内产生局地对流, 随后回波自西北向东南不断移动发展, 其后不断有小的对流单体产生, 17 时 50 分(图 5(a))对流发展为水平尺度约为 100 km, 最大反射率超过 65 dBZ 的中尺度对流系统。18 时 47 分(图 5(b))反射率因子由低到高向前侧入流一侧倾斜, 出现弱回波区(图略)。19 时 27 分(图 5(c))对流风暴右后端出现钩状回波结构, 垂直剖面图上出现弱回波区和回波悬垂(图 6(a)), 对应中低层速度图上出现明显的中气旋。20 时 02 分(图 5(d)), 风暴移动方向左前侧出现明显的“V”型入流缺口, 入流缺口正好对应中气旋所在的位置。

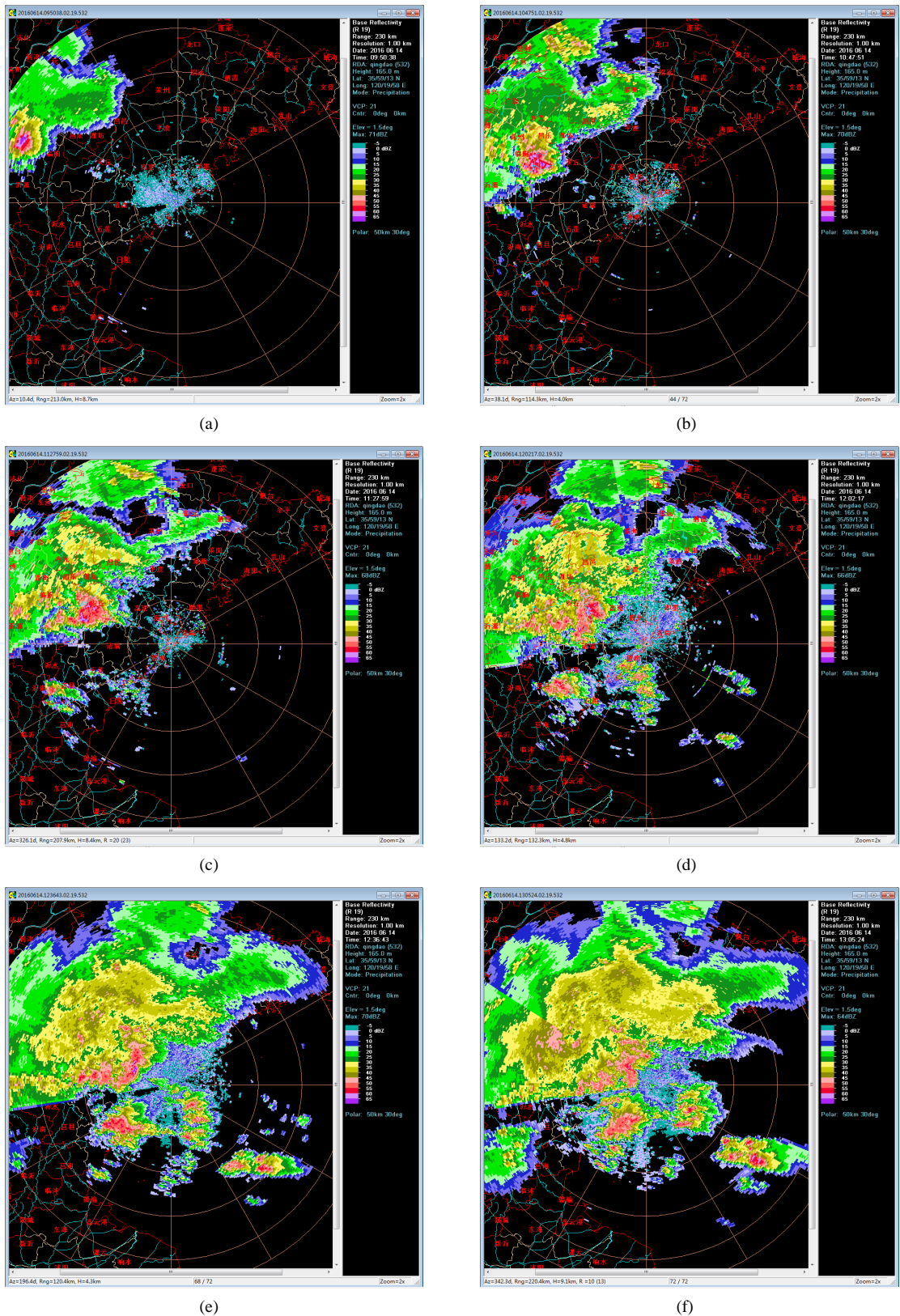


Figure 5. Reflectivity factor at 17:50 (a) 18:47 (b) 19:27 (c) 20:02 (d) 20:30 (e) 21:05 (f) on June 14, 2016
图 5. 青岛雷达站 2016 年 6 月 14 日 1.5°仰角反射率因子(a. 17:50, b. 18:47, c. 19:27, d. 20:02, e. 20:30, f. 21:05)

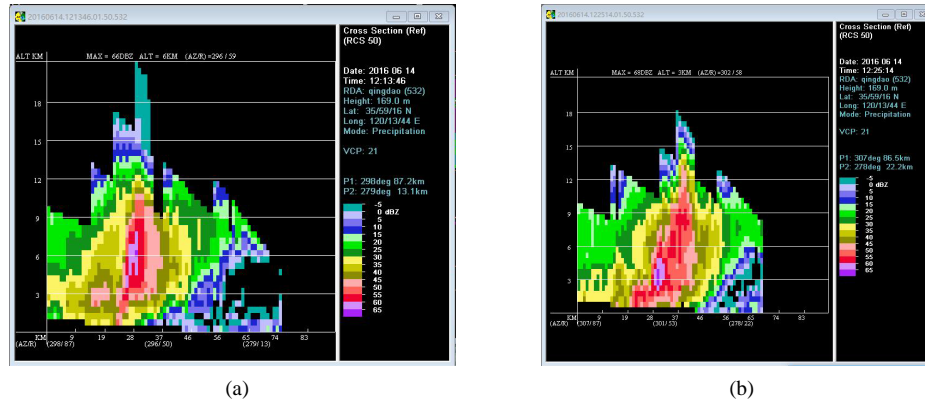


Figure 6. Sectional view at 20:13 (a)和 20:36 (b) on June 14, 2016
 图 6. 青岛雷达站 2016 年 6 月 14 日 20:13 (a)和 20:36 (b)剖面图

20 时 30 分(图 5(e))风暴位于高密境内并开始移入胶州境内影响青岛地区。此时对流发展旺盛, 回波层顶发展到 14 km (图 7(a)), 大于 65 dBZ 的反射率因子发展到 6 km, 高层回波反射率明显强于低层。(图 6(b))是沿低层入流缺口方向通过对流单体中心的反射率因子垂直剖面, 可以看出, 剖面上存在明显的回波悬垂结构, 同时高层回波层顶位于地面入流缺口的弱回波区域, 有明显的有界弱回波区结构和左侧回波墙, 有界弱回波区的水平尺度 9~10 km。大约 60 dBZ 的强反射率因子从 9 km 高度处一直扩展到低层, 最强的区域位于回波墙, 值超过 70 dBZ, 回波接地是出现强降水的典型特征。同时速度场上存在一个明显的中气旋(图 7(d)), 1.5°仰角旋转速度达到 20 m/s, 这些特征都表明此时雷暴发展旺盛, 同时胶州普集镇地区垂直累计液态水含量 VIL (图 7(b))由前一个体扫的 35 kg/m²跃增为 70 kg/m², 远大于刁秀广等[7]统计山东地区发生强冰雹的 VIL 最大值的平均值 55 kg/m²。Amburn and Wolf [8]的研究指出如果 VIL 密度(即 VIL 与风暴顶高度之比)超过 4 g/m³, 则风暴几乎肯定会产生直径超过 2 cm 的大冰雹。该个例中 VIL 密度大于 5 g/m³, 对应胶州铺集镇出现短时强降水天气并伴有冰雹天气, 20 时 30 分~21 时 00 分半小时雨量达到 62.7 mm。21 时 05 分(图 5(f))入流缺口消失, 速度图上的中气旋也消失, 对流开始减弱。

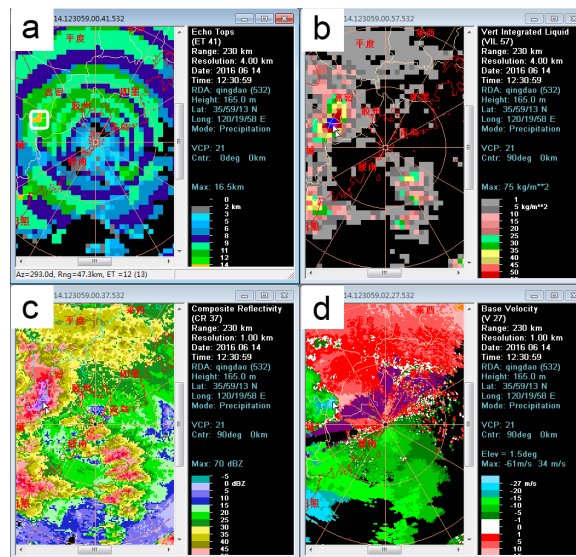
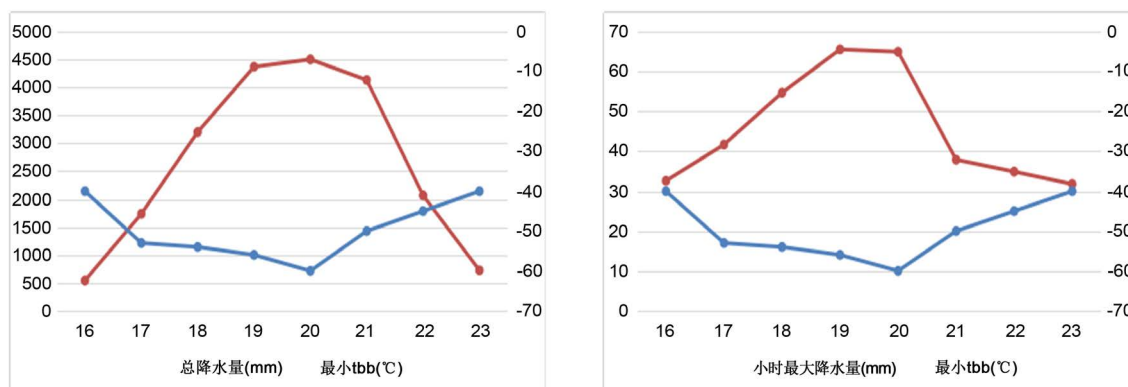


Figure 7. Radar product echo top height (a) vertical cumulative liquid water content (b) combined reflectivity (c) radial velocity (d) at 20:30 on June 14, 2016
 图 7. 青岛雷达站 2016 年 6 月 14 日 20:30 雷达产品(a. 回波顶高, b. 垂直累计液态水含量, c. 组合反射率, d. 径向速度)

5. FY-2F 卫星资料分析

云顶黑体亮温(TBB)是指示对流强弱的有效参考指标,云顶亮温越低,表明云顶越高,对流活动越强烈[9] [10] [11] [12]。研究表明云顶亮温(TBB)的大小及变化对短时强降水的预报具有很好的指示意义,TBB 能够较好的展现强降水的落区与强度的变化,并且 TBB 的梯度变化与强降水的演变有明显的对应关系。TBB 梯度突降时,降水也随之加强,突升时,降水随之减弱[13]。将最小 TBB 值与全省总降水量和小时最大降水量分别进行对比分析,发现 TBB 与两者都有很好的负相关关系。当 TBB 不断降低时,总降水量和小时最大降水量不断增加,而当 TBB 升高时,降水量又迅速开始减少。



本文利用 FY-2F 静止卫星的 1 h 平均云顶黑体亮温资料与大监站及区域自动站的逐时降水量资料进行对比分析。图 8 为山东降水量大于 10 mm 的站点分布与 TBB 对比图,可以明显的看出降水量大于 10 mm 的站点几乎全部分布在 TBB 梯度大值区附近,并且降水量大于 25 mm 的站点对应的 TBB 大部分在 TBB 小于 -42°C 区域。另外选取了青岛胶州(图 9(a))和西王圈小学(图 9(b))两个站点的 TBB 小时变化与小时降水量进行对比分析,可以看出降水量与 TBB 的确有很好的对应关系,两个站点降水均出现在 TBB 突降之后,并且降水出现时刻对应着 TBB 均低于 -40°C ,另外小时降水量大于 20 mm 的时刻对应的 TBB 皆低于 -50°C ,但并不是 TBB 越低降水量越大,并且当 TBB 开始上升时,降水趋于结束。

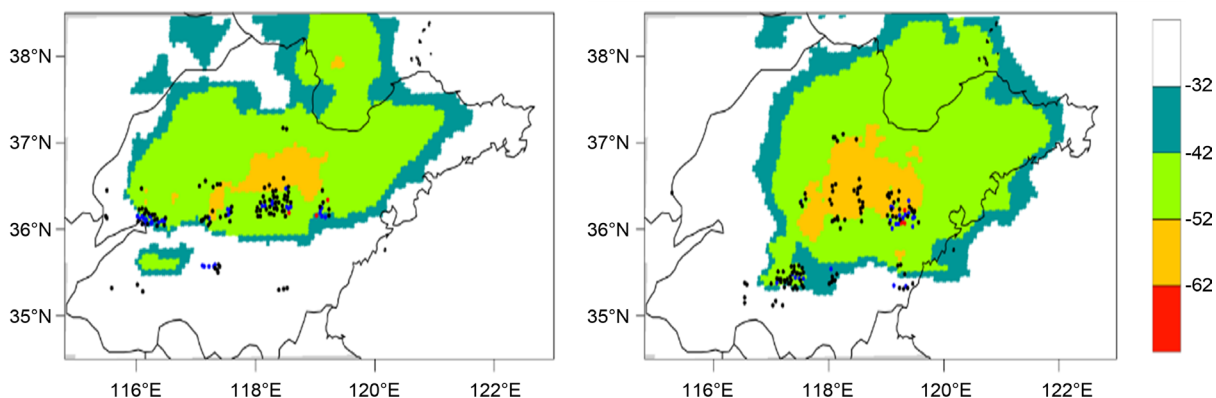


Figure 8. The distribution of TBB and the province's precipitation stations at 20:00 on June 14th, 2016 (black dots represent stations with precipitation between 10 - 25 mm, blue dots represent stations with precipitation between 25 - 50 mm, and red dots represent precipitation with precipitation greater than 50 mm)

图 8. 2016 年 6 月 14 日 19 时和 20 时 TBB 与山东降水量站点分布(黑点代表降水量介于 10~25 mm 的站点,蓝点代表降水介于 25~50 mm 的站点,红点代表降水量大于 50 mm 的站点)

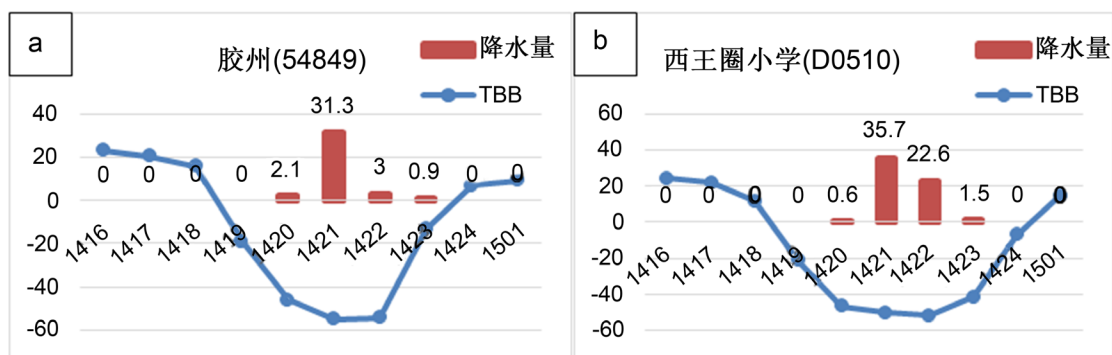


Figure 9. Jiaozhou (a) and Xiwanghuan Primary School (b) Correspondence diagram of precipitation (mm) and TBB (°C) during 16:00 on June 14th, 2016 to 01:00 on June 15th, 2016

图9. 2016年6月14日16时~15日01时胶州(a)和西王圈小学(b)降水量(mm)与TBB(°C)对应关系图

6. 结论

本文利用多普勒天气雷达、FNL、ECMWF及FY-2F静止卫星等数据,对发生在山东的一次短时强降水伴随风雹的强对流天气过程进行了分析,结果如下:

1) 本次过程为典型的冷涡槽前型强对流天气过程,在高空深厚冷涡及地面中尺度辐合抬升的大尺度背景下,配合上干下湿,强烈的垂直风切变,中层冷空气入侵等条件均为短时强降水的发展提供了有利的条件。

2) 雷达回波上具有回波悬垂,有界弱回波区,中气旋等显著特征,标志着此次对流风暴发展旺盛。回波层顶发展到14 km,垂直累积液态水含量偏高超过70 kg/m²,VIL密度大于5 g/m³,有利于冰雹的出现,同时回波接地又是短时强降水发生的典型标志。

3) FY-2F静止卫星的云顶黑体亮温(TBB)资料与强降水和总降水量有很好的负相关关系。并且降水一般发生在TBB突降之后,也即是TBB梯度大值区,同时降水发生时TBB必须降低到低于-40°C以下,而大于25 mm的降水量,TBB需要降到-50°C以下。而当TBB直线上升后,降水趋于停止。

基金项目

山东省气象局气象科学技术研究项目青年专项(sdqd2017-06)资助。

参考文献

- [1] 郑媛媛,姚晨,郝莹,等. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J]. 气象, 2011, 37(7): 795-801.
- [2] 曹钢锋,张善君,朱官中,等. 山东天气分析与预报[M]. 北京:气象出版社,1988:126-127.
- [3] 蓝渝,郑永光,毛冬艳,等. 华北区域冰雹天气分型及云系特征[J]. 应用气象学报, 2014, 24(5): 538-549.
- [4] 董海鹰,王建林,梁卫芳. 冷涡背景下两次强对流天气对比分析[J]. 山东气象, 2014, 34(3): 10-16.
- [5] 李云静,张建春,王捷纯,等. 一次冷涡背景下强对流不稳定条件的成因分析[J]. 气象, 2013, 39(2): 210-217.
- [6] 王兆华,邹大伟,王建波. 冷涡背景下局地冰雹云图特征分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2015(3): 408-411.
- [7] 刁秀广,朱君鉴,黄秀韶,等. VIL和VIL密度在冰雹云判据中的应用[J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1131-1139.
- [8] Amburn, S.A. and Wolf, P.L. (1997) VIL Density as a Hail Indicator. *Weather Forecasting*, **12**, 473-478. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1997\)012<0473:VDAHI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1997)012<0473:VDAHI>2.0.CO;2)
- [9] 陈秋萍,陈齐川,冯晋勤,等. “2012.4.11”两个强降雹超级单体特征分析[J]. 气象, 2015(1): 25-33.

- [10] 盛日锋, 王俊, 迟竹萍. 一次局地冰雹过程的 TBB 分析[J]. 山东气象, 2006, 26(4): 12-14.
- [11] 杜倩, 覃丹宇, 张鹏. 一次西南低涡造成华南暴雨过程的 FY-2 卫星观测分析[J]. 气象, 2013, 39(7): 821-831.
- [12] 张杰, 李文莉, 康凤琴, 等. 一次冰雹云演变过程的卫星遥感监测与分析[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 758-763.
- [13] 黄增俊, 黄芳, 黎惠金, 等. 广西一次强降雨 TBB 场特征分析[J]. 气象科技, 2013, 41(5): 906-914.