

华北冷涡背景下青岛三次混合型对流天气环境场条件对比分析*

马艳^{1,2}, 董海鹰², 郝燕², 官明晓³

(1. 青岛市气象灾害防御工程技术研究中心, 山东 青岛 266003; 2. 青岛市气象局, 山东 青岛 266003; 3. 青岛市即墨区气象局, 山东 青岛 266200)

摘要: 利用探空观测资料, 对比分析华北冷涡背景下青岛三次混合型对流天气过程环境场条件, 揭示出现短时强降水、雷暴大风和冰雹天气时的水汽、稳定性和垂直风切变差异特征。分析结果表明: 500 hPa 上冷涡中心位于 42°N 的华北冷涡、850 hPa 低涡系统和偏南风急流以及地面气旋是这三次混合型对流天气的影响系统; 在这三次混合型对流过程中有无雷暴大风天气的环境参数区别比较显著: 有雷暴大风表现出了相对较干的中低层和 500 hPa 存在浅薄湿层的水汽层结, 无雷暴大风的则是上干下湿和中层大气干燥的层结特征; 稳定性差异决定了对流强度的差异; 同时出现短时强降水、雷暴大风和冰雹的对流天气的层结不稳定性最强, 表现为较大的 850 和 500 hPa 温差 (大于 30 °C) 以及较强的 0~3 km 垂直风切变 (大于 12 m·s⁻¹); 出现短时强降水和大风的大气层结稳定性最弱, 相应的环境参数值也最小; 在强不稳定层结和低层水汽充足的条件下, 大于 12 m·s⁻¹ 的 0~3 km 垂直风切变对青岛地区雷暴大风和冰雹的预报预警有较好的指示意义。

关键词: 华北冷涡; 混合型对流天气; 环境场条件; 青岛天气

中图分类号: P458.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2021)04-013-08

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20200069

引用格式: 马艳, 董海鹰, 郝燕, 等. 华北冷涡背景下青岛三次混合型对流天气环境场条件对比分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(4): 13-20.

MA Yan, DONG Hai-Ying, HAO Yan, et al. Contrastive analysis for environmental conditions of three co-existence convective processes at Qingdao under the background of cold vortex over North China[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(4): 13-20.

高空冷涡是在对流层中、上层的冷性低压系统。东亚地区的高空冷涡常形成于贝加尔湖附近, 后经蒙古国、中国内蒙古和东北地区缓慢东移, 根据其所处地理位置又分为蒙古冷涡、华北冷涡和东北冷涡。由于包含冷涡系统的大气环流冷热对比强, 不稳定状态以及触发条件分布的不均匀性, 在冷涡系统形成、发展、消亡期均可发生局地性强, 致灾性强的短时强降水、大风、冰雹等天气。

近年来国内许多气象工作者针对此类天气从气候学、数值模拟和天气学分析等角度开展了一系列研究工作^[1-9]。每年春末夏初在东北、京津冀乃至山东半岛地区高空冷涡系统出现的频率很高, 也是造成这一带地区强对流天气的重要天气系统^[10-14]。郁珍艳等^[15]开展了京津冀地区华北冷涡背景下短时强降水、大风、冰雹和龙卷的基本对流参数特征分析。雷蕾等^[16]利用探空资料判别了北京地区冰雹、雷暴大风以及暴雨强对流天气类别。李江波等^[17]给出了华北冷涡下冰雹发生的水汽条件和抬升机制, 并指出水汽条件分析的重点

应在低层大气、抬升机制的分析侧重在边界层以下等预报着眼点。虽然一定的大气可降水量是形成短时强降水的必要条件, 但对对流过程而言, 如果不考虑蒸发过程, 降水强度主要取决于水汽垂直递减率和低层大气对流有效位能的大小^[18]。张小玲等^[19]还开发了包括水汽、不稳定、抬升和垂直风切变 4 个条件的中尺度对流天气的环境场条件分析技术。高晓梅等^[20]指出山东中部地区强降水混合型对应的 850 和 500 hPa 温差的最低阈值为 25 °C、相应的 0~6 km 风垂直切变最低阈值为 8.0 m/s 等环境场要素特征。史伟恒等^[21]则给出了山东聊城地区强对流天气预报的判定指标。

青岛地处山东半岛东南部, 具有山、海、城、岛丰富的下垫面特征, 几乎每年 6 月都会受高空冷涡的影响出现短时强降水、雷暴大风以及冰雹等强对流天气。混合型强对流天气通常指的是短时强降水伴随着纯雷暴大风或者冰雹雷暴大风的天气。2018 年 6 月 13 日受华北冷涡影响青岛市出现了短时强降水、雷暴大风和冰雹天气, 是一次混合型强对流, 全市 70 325 人受

* 基金项目: 环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201709)资助

Supported by the Science and Technology Cooperation Innovation Fund Around Bohai Sea(QYXM201709)

收稿日期: 2020-03-08; 修订日期: 2020-05-13

作者简介: 马艳(1970-), 女, 研究员。E-mail: qdyanma@163.com

灾,直接经济损失达 3.36 亿元。通常强对流天气形成快,影响时间短,造成的危害大,预报预警难度大,天气预报员没有充足的时间利用多源观测资料和多种模式产品开展对流天气潜势分析,预报服务压力大,迫切需要一个能够直接、简单、高效的用于预报业务的强对流预报手段和指标。本文从预报业务服务工作的角度出发,利用青岛站探空资料,对比分析 2014、2016 和 2018 年 6 月华北冷涡背景下发生在青岛的三次混合型对流天气过程的环境场条件特征,给出高空冷涡背景下青岛发生短时强降水、雷暴大风和冰雹的混合型对流天气的动力和热力参数特征,以期对青岛此类天气的短临预报业务有参考意义。

1 资料介绍

利用由欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 分析场开展大尺度环流场的分析。通过分析青岛地区崂顶、普集镇和青岛站的逐小时降水量、风速的观测资料开展对流天气发生期间降水量和风速的变化特征。其中自动气象站崂顶、普集镇和青岛站的地理位置分别为 $(36.18^{\circ}\text{N}, 120.62^{\circ}\text{E})$ 、 $(36.12^{\circ}\text{N}, 119.72^{\circ}\text{E})$ 和 $(36.07^{\circ}\text{N}, 120.33^{\circ}\text{E})$ 。最后利用探空站青岛站资料分析强对流天气发生前期不同高度温湿和风速风向的变化,其中青岛探空站资料来源于美国怀俄明大学(<http://>

weather.uwyo.edu)。

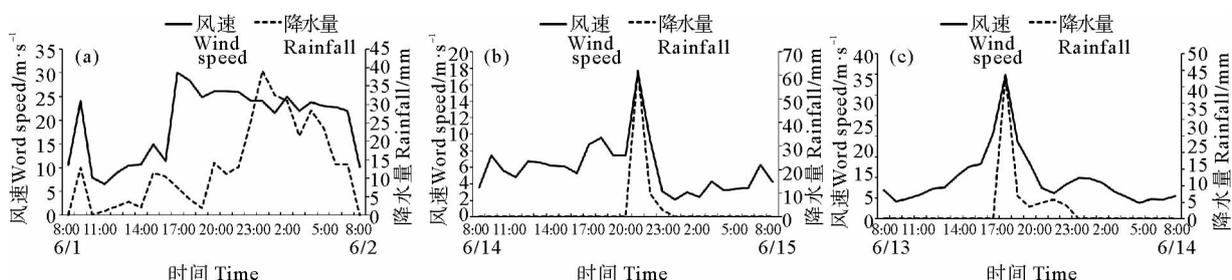
2 强对流天气过程概况

2014 年 6 月 1~2 日在华北冷涡和地面气旋的共同影响下,青岛全市共计出现了暴雨 14 个站、大暴雨 5 个站和 2 个站次的特大暴雨。本次过程雨量最大站点出现在崂山区北九水 319.5 mm,小时最大雨强 39.1 mm 出现在崂顶(见表 1)。在本文描述中将此次过程简称为 20140601 过程,以下类同。

2016 年 6 月 14 日 20~22 时(北京时,下同)在华北冷涡控制下青岛市区、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。胶州市铺集镇出现暴雨、大风和冰雹,小时最大雨强 62.7 mm。

2018 年 6 月 13 日受深厚华北冷涡影响,13 日 01~23 时,青岛全市累计平均降水量 32.2 mm,出现 21 个站次暴雨,崂山区气象度假村最大 94.6 mm,小时最大雨强达到了 66.1 mm。全市多个观测站点出现 10~12 级雷雨大风,青岛站出现极大风速 $34.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (12 级),市区、崂山、黄岛、胶州、平度局部地区还先后出现冰雹。

这三次过程均为混合型对流天气天气过程,共同点是都有短时强降水和地面 8 级或以上阵风天气,差异主要表现在对流强度上。



(a)2014 年 6 月 1 日崂顶站; (b)2016 年 6 月 14 日普集镇站; (c)2018 年 6 月 13 日青岛站。(a)June 1st, 2014 at Laodintop; (b)June 14th, 2016 at Pujizhen; (c)June 13th, 2018 at Qingdao.)

图 1 气象站点逐小时降水量和地面阵风风速时间序列
Fig.1 Time series of hourly rainfall and surface wind speed

如图 1 和 2 所示,2014 年过程降雨稳定均匀,以层状云降水为主,持续时间长,局部有弱对流,凌晨前后在崂顶出现了短时强降水,地面大风是东南急流造成的系统性大风,而不是对流性雷暴大风。2016 和 2018 年两次过程是以对流性强降水为主,并伴有冰雹和强雷暴大风天气;2016 年 6 月 14 日 21:00 普集镇站小时降水量 62.7 mm,阵风 $17.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,2018 年 6 月 13 日 18:00 青岛站小时降水量达到了 43.7 mm 并伴随着 $34.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的阵风(见图 1)。本文依据所发生的天气现象的种类和强度,对流强度依次表现为 2018 年 6 月 13 日最强,2016 年 6 月 14 日次之,2014 年 6 月 1 日最弱。

3 环流形势分析

2016 年 6 月 14 日和 2018 年 6 月 13 日 08 时 500 hPa 高度场上均表现为欧亚中高纬度地区为两槽一脊型,贝加尔湖以西是一高压脊,引导极地冷空气南下,在俄罗斯、东北和华北一带表现为较强的低值区。冷中心分别为 -13 和 -15°C 的低涡位于 42°N 附近。青岛地区处于冷涡系统影响下,上游有较强的冷平流侵入,同时在 700 和 850 hPa 也有对应的低涡系统存在(见图 3(b),(c))。这种中低层都有低涡系统存在的天气形势是一种有利于强对流发生发展的大尺度环流背

景。而 2014 年 6 月 1 日 08 时 500 hPa 高度场上, 贝加尔湖以东为高压脊, 华北地区为一个切断低涡, 伴有

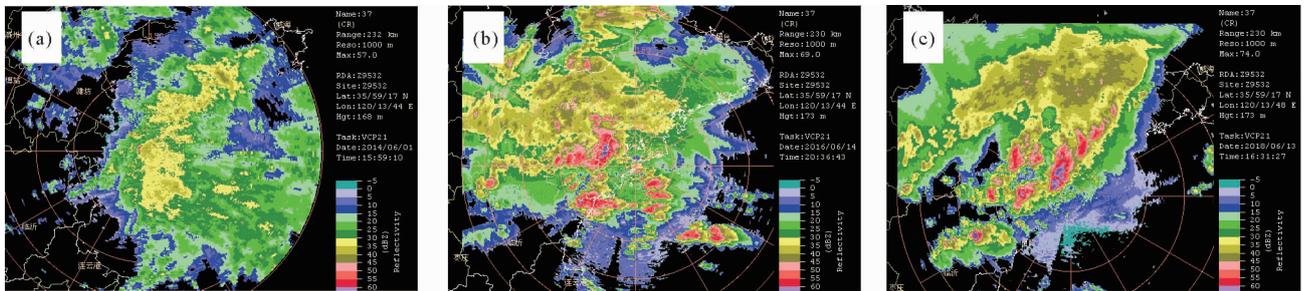
-13°C 的冷中心的低涡虽也在 42°N 附近, 但是涡后部表现为一个暖脊, 没有上游的冷平流补充(见图 3(a))。

表 1 华北冷涡下青岛三次混合型对流天气过程概况

Table 1 Three co-existence convective processes at Qingdao under the background of cold vortex over North China

天气过程 ^①	过程平均雨量 ^② /mm	青岛站雨量 ^③ /mm	小时最大雨量 ^④ /mm	极大风速 ^⑤ /m·s ⁻¹	是否出现冰雹 ^⑥	是否出现雷电 ^⑦
20140601	37.0	31.9	39.1	21.6	否	否
20160614	18.9	18.9	62.7	20.2	有	否
20180613	24.3	54.1	66.1	34.8	有	有

Note: ①Weather process; ②Mean rainfall for a process; ③Rainfall at Qingdao; ④Maximum hourly rainfall; ⑤Maximum wind speed; ⑥Hailstone appeared or not; ⑦Lighting appeared or not.



((a)2014年6月1日15:59;(b)2016年6月14日20:36;(c)2018年6月13日16:31。(a)15:59 June 1st, 2014; (b)20:36 June 14th, 2016; (c)16:31 June 13th, 2018.)

图 2 青岛 S 波段探空雷达组合反射率
Fig.2 Composite reflectivity at Qingdao

这三次强对流天气发生时, 地面都有气旋生成, 2014 年 6 月 1 日 08 时气旋中心强度为 1 002.5 hPa, 青岛地区位于气旋东北部顶部辐合处, 而 2016 年 6 月 14 日和 2018 年 6 月 13 日气旋中心强度则低至 998 hPa, 青岛地区位于气旋前部, 低层辐合抬升较强。同时三次过程都存在低空偏南风急流, 但急流强度存在明显差异。20140601 过程监测到 $23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右的东南风急流, 某些时段急流更强, 可达 $27\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上(图略), 青岛同时处于东南风和东北风的辐合之中, 对短时强降水发生起到触发作用。另外两次过程存在 $12\sim 14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 西南风急流, 20180613 过程还表现出了高层西北风输送的干冷空气与低层西南暖湿气流随高度顺转的暖平流活动特征, 为强对流天气的发生发展提供了较大的不稳定能量、水汽条件和触发条件。

4 强对流天气发生时的环境条件

4.1 水汽条件

图 4 分析了 2014 年 6 月 1 日 20 时(距离对流天气发生前 4 小时)、2016 年 6 月 14 日 20 时(距离对流天气发生前 1 小时)、2018 年 6 月 13 日 08 时(距离对流天气发生前 10 小时)青岛站各气象要素垂直分布, 从

青岛站温度露点差和相对湿度的廓线分布, 如图 4(e) 和 4(f) 所示, 三次过程均表现出了近地面饱和, 但在其以上又具有不同的分布形态。20140601 是这三次对流过程中水汽条件最好的, 在 3 000 m 高度以下温度露点差均小于 2°C , 925~700 hPa 平均相对湿度大于 90%; 但 500 hPa 相对湿度仅为 9%, 为干层特征, 具有典型的短时强降水的水汽层结特征。20160614 湿层不太明显, 在 3 000 m 高度以下层平均温度露点差为 5.7°C , 925~700 hPa 平均相对湿度 68%, 500 hPa 相对湿度 39%。20180613 过程水汽条件是最差的, 对流天气发生前中低层较干, 925~700 hPa 平均相对湿度 35%, 但是在 500~400 hPa 存在平均相对湿度 73% 浅薄湿层, 这种中层湿中下层干的配置更有利于风雹的产生。分析青岛站 850 hPa 温度露点差和 500 hPa 温度露点差 12 h 变化(见表 2), 也反映出 20180613 过程期间浅薄湿层和明显干层特征。总的来看, 中低层较厚湿层和中层干燥大气存在利于强降水天气出现; 三次过程都有干空气侵入, 干空气侵入强度越强以及较低的干层层次较容易诱发较强的地面大风和冰雹天气的产生。这是因为雷暴大风是由雷暴云中一股强下沉气流到达地面或地面附近产生的。而雷暴云中内的下沉气流的

一个来源就是雷暴云周围对流层中层的干冷空气从云体右后方进入,并和云中的空气混合,然后下沉到地面而形成的。因此,对流层中层干冷空气侵入与雷暴大风的产生有着密切的关系。

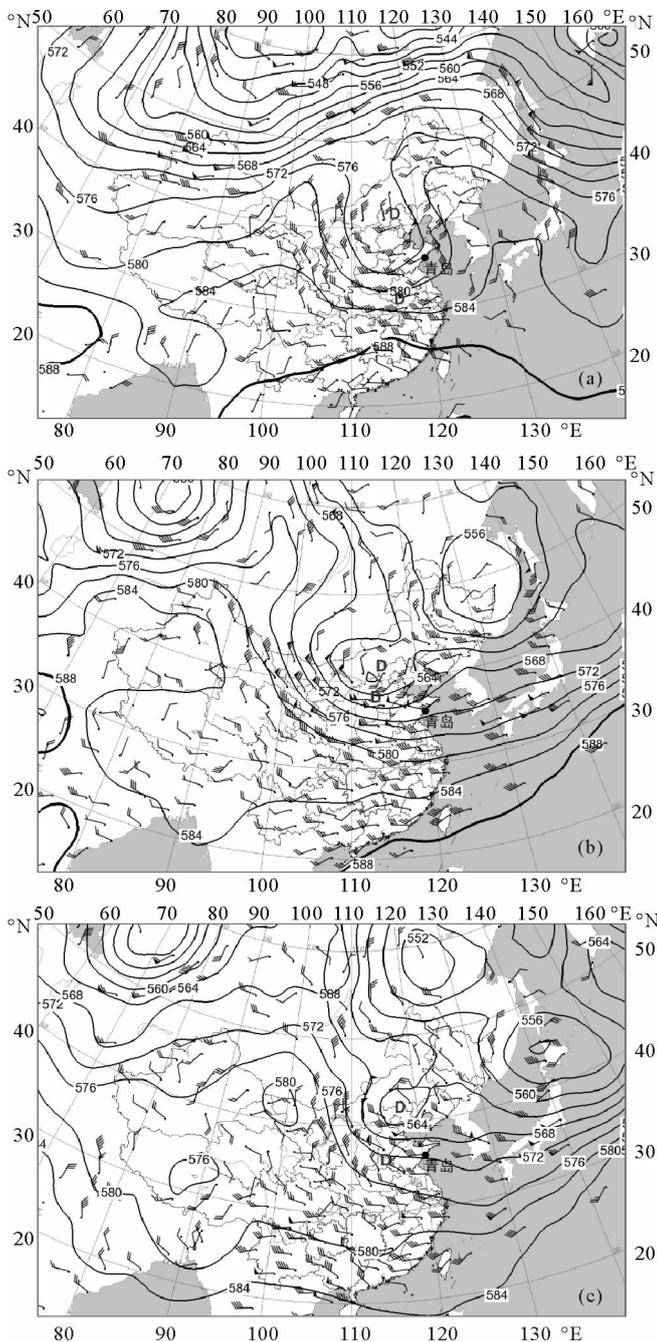


图3 2014年6月1日(a)、2016年6月14日(b)和2018年6月13日(c)08时500hPa环流形势
Fig.3 500 hPa circulation fields at (a)08:00 June 1st, 2014, (b) 08:00 June 14th, 2016 and (c) 08:00 June 13th, 2018

大气可降水量是一个地区上空整层大气的水汽全部凝结并降至地面的降水量。可用下式表示:

$$PW = \frac{1}{g} \int_{P_0}^{P_t} q dp$$

其中: PW 为大气可降水量; q 为比湿; g 为重力加速度; P_t 、 P_0 分别为大气顶部气压和地面气压。由于大气中高层水汽含量很少,绝大部分集中于中低对流层,所以在计算可降水量时,其积分限从地面取至300或400 hPa即可。本文分析这三次混合型对流过程以及每一次对流过程发生前和发生时地面露点温度和大气可降水量的变化来表征对流天气过程中的水汽绝对含量。露点温度在13~21,大气可降水量值在28~39 mm之间变化,差异都不大。三次过程都出现了短时强降水,但是降水强度又有差异,20140601最弱,20180613最强。在大气可降水量差别不大的情况下,20180613过程有中高层西北风输送干冷空气侵入造成500 hPa降温,850 hPa低层却又增暖的环境大气对应的降水强度就更大,同时也发现CAPE越大的环境大气也和较大的降水强度有一定的对应关系(见表2和3)。

4.2 不稳定条件

对流发生前的大气层结状态对于预判对流强度具有重要的指示意义。三次过程大气稳定度差异明显,20160614和20180613过程均发生在不稳定的环境大气中,明显强于20140601大气不稳定性。从反映大气垂直温度梯度的850和500 hPa温度差来看(见表2),20160614高低空温差值为29.7 °C,20180613的更是达到了34.7 °C,远大于20140601弱对流过程的21.9 °C的高低空温差值。统计发现,夏季华北地区冰雹和雷暴大风的高低空温差均值可达28 °C以上,而暴雨均值为25 °C,说明不太大的高低层温差条件即可产生暴雨,但是强的雷暴天气必须要达到比较大的温差才有可能出现^[16]。青岛站500和850 hPa 24 h变温也进一步表明了这两次过程在中层有干冷空气侵入,低层大气是一个增暖的上冷下暖的不稳定层结。如图4(b)所示,在1~3 km高度范围内这三次冷涡天气也都呈现出相当位温随高度下降或者随高度变化很小的不稳定层结特性,但是同时出现了短时强降水、雷暴大风和冰雹的20180613过程,相对位温还呈现出了在低层出现极大值,在中层出现极小值且极小值随高度增加的显著的不稳定层结特征。此外,在对流天气发生前,20160614和20180613的500和850 hPa相当位温差均在10 K以上(见表2),与20140601过程相比表现出了强的不稳定性。在强的环境大气不稳定性层结状态下,发生对流天气的强度也较强。

在对流天气发生前,如图4(a)所示,20140601没有逆温层结,20160614和20180613低层都存在逆温层结。2016年6月13日08时,在对流天气发生前39小时,青岛近地面层存在逆温强度为0.47 °C/100 m逆温层,之后逆温层结持续存在,但是逆温强度呈现出了先增强又减弱的特点,到对流天气发生前3小时左右,逆

温层结减弱为中性层结。2018年6月12日08时,对流天气发生前的33小时为非常浅薄的逆温层,之后逆温强度不断加强,从6月12日08时的 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 发展到13日08时的 $0.80\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。对流天气发生前存在强的逆温层结和逆温层结持续时间长均有利于不稳定能量的积聚,给强对流天气的发生提供充足的能量。20160614和20180613过程均发生了冰雹、短时强降水和大风天气。

4.3 垂直风切变条件

风向风速随高度的变化影响着对流系统的组织、结构和演变。一般情况下,风垂直切变越大,风暴生命史越长,强度也会越强^[22]。0~3 km和6 km风垂直切变为地面和3和6 km高度处上下两层的风矢(或风速)差。Rasmussen和Blanchard^[23]认为,0~3 km高度范围内风随高度顺转是风暴形成、发展的一个关键

因子。低层0~3 km风切变对飑线的发展维持最为重要,但是在飑线发展旺盛阶段应考虑0~6 km的风切变^[2]。如表3所示,20140601、20160614和20180613过程0~6 km垂直风切变均达到了中等或以上强度^[24],0~3 km垂直风切变值差异较大。同时出现了冰雹、雷暴大风和短时强降水的20180613过程,虽然其0~6 km风切变是在这三次过程中最小的,但是0~3 km垂直风切变却是最大的,强对流天气结束时其量值还有 $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。20140601出现了短时强降水和大风,青岛站0~3 km垂直风切变较小($-2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,地面风明显强于700 hPa高度上的风,如图4(c)所示),0~6 km垂直风切变达到了 $23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对于这三次混合型对流天气过程,在存在不稳定层结和低层水汽充足的情况下,0~3 km垂直风切变对青岛及周边地区强雷暴大风和冰雹的预报预警有较好的指示意义。

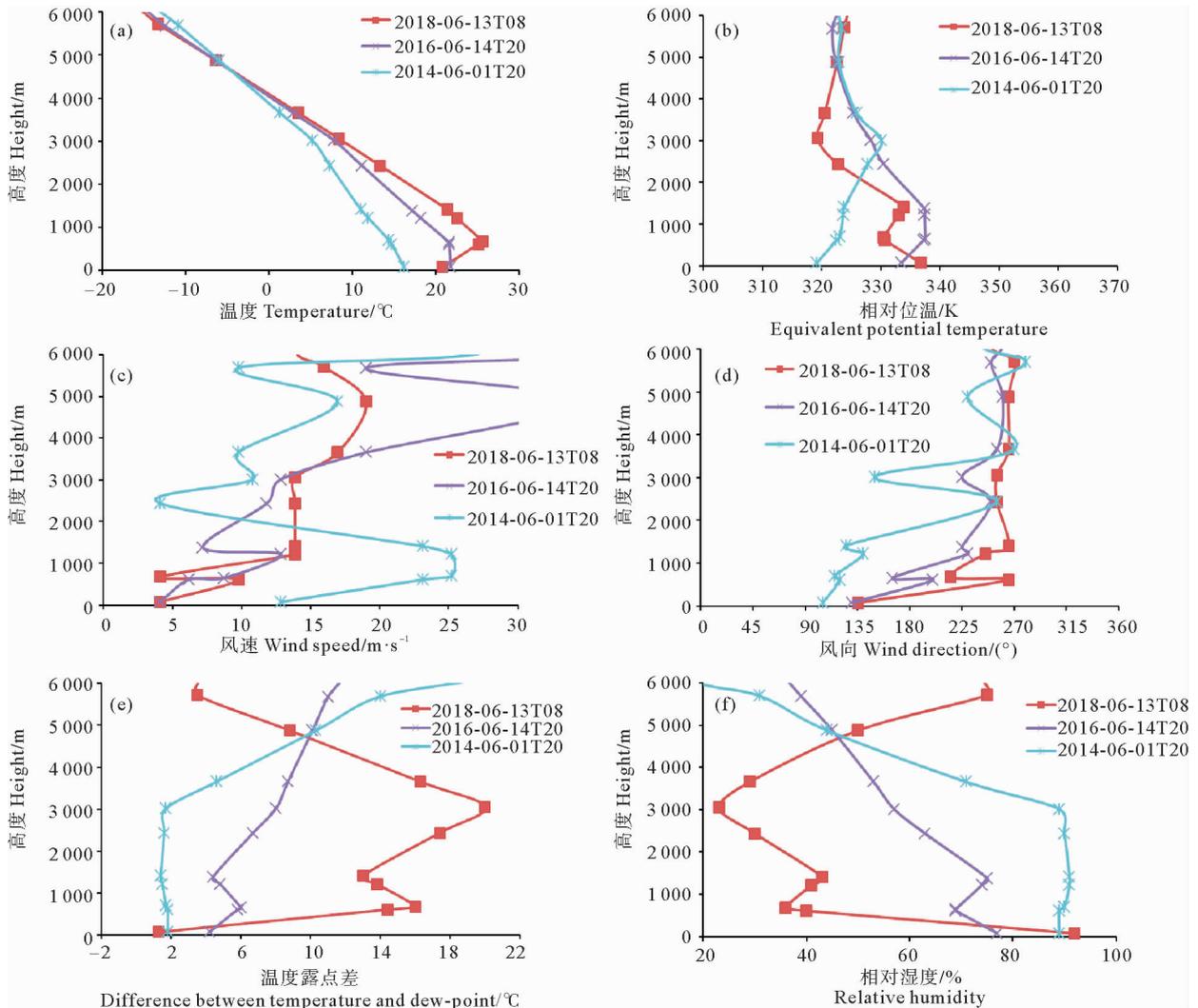


图4 三次对流天气下青岛站各气象要素垂直分布

Fig.4 Profiles of meteorological variables at site of Qingdao under three convective processes

表2 青岛站各气象要素 12 h 变化特征

Table 2 Variations in 12 h on meteorological variables at Qingdao

时间 Time	500 hPa 温度 露点差 ^① /℃	850 hPa 温度 露点差 ^② /℃	500 hPa 风速 ^③ /m·s ⁻¹	850 和 500 hPa 温差 ^④ /℃	500 hPa 24 h 变温 ^⑤ /℃	850 hPa 24 h 变温 ^⑥ /℃	500 和 850 hPa 相当位温差 ^⑦ /K	大气可 降水量 ^⑧ /mm
2014-06-01T08	1.5	10.0	11.8	21.5	3.8	-7.0	17.7	38.61
2014-06-01T20	14.0	1.4	9.8	21.9	-1.2	-9.4	-0.5	34.51
2016-06-14T08	22.0	12.0	20.0	25.5	3.4	3.4	-0.6	32.33
2016-06-14T20	11.0	4.4	19.0	29.7	-2.6	0.2	-15.5	36.93
2018-06-13T08	3.5	13.0	15.9	34.7	-0.8	5.8	-10.1	28.0
2018-06-13T20	3.5	2.9	14.9	22.7	2.2	-7.8	-5.6	31.92

Note: ①Difference between temperature and dew-point temperature at 500 hPa; ②Difference between temperature and dew-point temperature at 850 hPa; ③500 hPa wind speed; ④temperature between 850 and 500 hPa; ⑤500 hPa temperature difference in 24 h; ⑥850 hPa temperature difference in 24 h; ⑦ Equivalent potential temperature between 500 and 850 hPa; ⑧Precipitation water.

表3 青岛站大气稳定度指数

Table 3 Atmospheric stability indexes at Qingdao

时间 Time	SI/℃	K/℃	CAPE /J·kg ⁻¹	0~3 km 风切变 ^① /m·s ⁻¹	0~6 km 风切变 ^② /m·s ⁻¹	0℃层 高度 ^③ /m	-20℃层 高度 ^④ /m
2014-06-01T08	8.00	20.0	1.2	14.0	19.0	4 146	8 083
2014-06-01T20	2.77	31.0	0.0	-2.0	23.0	3 848	6 943
2016-06-14T08	4.54	26.0	0.0	12.3	18.5	4 455	7 549
2016-06-14T20	-5.21	35.0	441.6	19.2	25.2	4 033	6 849
2018-06-13T08	-3.98	23.1	1 008	12.0	13.0	4 087	6 769

Note: ①0~3 km wind shear; ②0~6 km wind shear; ③0℃ layer height; ④-20℃ layer height.

风向的垂直变化情况是:20140601 短时强降水过程前期为整层的偏南风,20160614 天气过程,除在 3 600~5 800 m 高度上有浅薄的西北风外,在强对流天气发生前其余各高度上均表现为暖湿的偏南风。对于 20180613 强对流天气,则明显表现出了中高层西北风输送的干冷空气与低层西南暖湿气流的随高度顺转的暖平流活动特征(见图 4(d))。在这样的风场结构下,大气层结不稳定加剧,为强对流天气的发生发展提供了较大的不稳定能量、水汽条件和触发条件。

5 结论和讨论

华北冷涡背景下 2014 年 6 月 1 日青岛出现了短时强降水和大风、2016 年 6 月 14 日出现了短时强降水、大风和冰雹、2018 年 6 月 13 日则出现了短时强降水、雷暴大风和冰雹天气。本文通过对比分析这三次不同强度混合型对流天气过程环流形势以及水汽、不稳定和垂直风切变环境场条件特征,得到了如下结论:

(1)这三次过程 500 hPa 上华北冷涡位置均位于 42°N

附近,700 和 850 hPa 有对应低涡系统存在,青岛处在在地面气旋的前部或东北部顶部辐合较强处;不同点是 20160614 和 20180613 对流天气过程冷涡后有冷空气补充,低层为西南急流,20140601 低层为更强的东南急流。

(2)上干下湿,925~700 hPa 较厚湿层以及较大的相对湿度配合中层干空气的水汽分布有利于短时强降水天气出现;500~400 hPa 浅薄湿层和中下层干的配置以及干空气侵入容易诱发地面大风和冰雹天气的产生。

(3)天气过程中环境稳定度差异决定了对流强度的差异。同时出现短时强降水、雷暴大风和冰雹的 20180613 的层结不稳定性明显强于只出现短时强降水和大风的 20140601 过程;强的东南急流为不稳定条件较差的 20140601 过程提供丰富的水汽和动力条件。对流天气发生前 24 h 存在逆温层结或中性层结并持续有利于不稳定能量的积聚,给雷暴大风和冰雹强对流天气的发生提供了充足的能量。

(4)在不稳定层结存在和低层水汽充足的情况下,0~

3 km 垂直风切变对青岛地区强雷暴大风和冰雹天气的预报预警有较好的指示意义。

在高空冷涡背景下,受地形地貌特征、不同季节气候差异以及局地环流特征的影响,发生强对流天气的环境场条件也会具有不同的变化特点,对于不同地区或同一范围都会存在这些差异性。本文只是针对青岛6月份三次冷涡过程开展了总结分析,希望其中定性和定量的分析能够为此类天气的预报服务工作提供借鉴和帮助,但是更多具有普适性的量化指标还需要在多个个例总结下提炼和完善。

参考文献:

- [1] 张信华,余建华,范明福,等. 闽北不同季节强对流天气异同点分析[J]. 气象, 2010, 36(6): 29-34.
Zhang Xinhua, Yu Jianhua, Fan Mingfu, et. al. Characteristics analysis of severe convective weather in different season of north Fujian Province[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(6): 29-34.
- [2] 陈明轩,王迎春. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飑线过程发展维持的数值模拟[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 371-386.
Chen Mingxuan, Wang Yingchun. Numerical simulation study of interaction effects of the low-level vertical wind shear with the cold pool on a squall line evolution in North China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(3): 371-386.
- [3] 姚晨,郑媛媛,张雪晨. 长生命史飑线在强、弱对流降水过程中的异同点分析[J]. 高原气象, 2012, 31(5): 1366-1377.
Yao Chen, Zheng Yuanyuan, Zhang Xuecheng. Analyses on different and common points of long life squall line in severe, weak convective precipitation processes[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(5): 1366-1377.
- [4] 郁珍艳,何立富,李泽椿. 1999—2008年夏季华北冷涡的异常特征分析[J]. 气象科技, 2012, 40(2): 256-261.
Yu Zhenyan, He Lifu, Li Zechun. Anomalous features of summer cold vortex over North China from 1999 to 2008[J]. Meteorological Science and Technology, 2012, 40(2): 256-261.
- [5] 许爱华,孙继松,许东蓓,等. 中国东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 2014, 40(4): 400-411.
Xu Aihua, Sun Jisong, Xu Dongbei. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(4): 400-411.
- [6] 陈伟斌,陈见,赵金彪,等. 一次飑线大天气过程成因分析[J]. 气象研究与应用, 2015, 36(1): 14-19.
Chen Weibin, Chen Jian, Zhao Jinbiao, et. al. Causative analysis of a squall line windy weather process[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2015, 36(1): 14-19.
- [7] 吕晓娜. 河南一次强对流天气潜势、触发与演变分析[J]. 高原气象, 2017, 36(1): 195-206.
Lu Xiaonan. Potential trend, trigger and evolution analysis of a thunderstorm case in Henan[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(1): 195-206.
- [8] 符式红,王秀明,俞小鼎. 相似环流背景下海南两次不同类型强对流天气对比研究[J]. 气象学报, 2018, 76(5): 742-754.
Fu Shihong, Wang Xiuming, Yu Xiaoding. A comparative study on two consecutive severe convective weather events in Hainan-an under similar background[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(5): 742-754.
- [9] 朱平,俞小鼎. 青藏高原东北部一次罕见强对流天气的中小尺度系统特征分析[J]. 高原气象, 2019, 38(1): 1-13.
Zhu Ping, Yu Xiaoding. Analysis of meso-small scale system characteristics of a rare severe convective weather in the Northeast Part of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(1): 1-13.
- [10] 丁青兰,王令,陈明轩,等. 北京地区暖季对流天气的气候特征[J]. 气象, 2007, 33(10): 37-44.
Ding Qinglan, Wang Ling, Chen Mingxuan, et. al. Climate character analysis of convective weather during warm season(May to September) in Beijing[J]. Meteorological Monthly, 2007, 33(10): 37-44.
- [11] 王丽荣,裴宇杰,陈明轩,等. 北京对流性天气的高空气候背景分析[J]. 气象与环境学报, 2007, 23(5): 1-7.
Wang Lirong, Pei Yujie, Chen Mingxuan, et. al. Upper-air climate background analysis of convective weather in Beijing[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2007, 23(5): 1-7.
- [12] 蒋大凯,王江山,闫琦,等. 1961—2010年5~9月东北冷涡气候特征及其对辽宁气温的影响[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(2): 5-9.
Jiang Dakai, Wang Jiangshan, Yan Qi, et. al. Climatic characters of northeast cold vortex and its effect on air temperature in Liaoning province from May to September during 1961—2010[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2012, 28(2): 5-9.
- [13] 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.
Dong Haiying, Wang Jianlin, Liang Weifang. Comparative analysis of two severe convective weathers on the cold vortex[J]. Journal of Shandong Meteorology, 2014, 34(3): 10-16.
- [14] 高晓梅,俞小鼎,王令军,等. 山东半岛两次海风锋引起的强对流天气对比[J]. 应用气象学报, 2018, 29(2): 245-256.
Gao Xiaomei, Yu Xiaoding, Wang Lingjun, et. al. Comparative analysis of two strong convections triggered by sea-breeze front in Shandong Peninsula[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2018, 29(2): 245-256.
- [15] 郁珍艳,何立富,范广洲,等. 华北冷涡背景下强对流天气的基本特征分析[J]. 热带气象学报, 2011, 27(1): 89-94.
Yu Zhenyan, He Lifu, Fan Guangzhou, et. al. The basic features of the severe convective at the background of cold vortex over North China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27(1): 89-94.
- [16] 雷蕾,孙继松,魏东. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J]. 气象, 2011, 37(2): 136-141.
Lei Lei, Sun Jisong, Wei Dong. Distinguishing the category of the summer convective weather by sounding data in Beijing[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(2): 136-141.
- [17] 李江波,王宗敏,王福侠,等. 华北冷涡连续降雹的特征与预报[J]. 高原气象, 2011, 30(4): 1119-1131.
Li Jiangbo, Wang Zongmin, Wang Fuxia, et. al. Characteristics and forecasting of continuous hail shooting processes caused by the North China Cold vortex[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(4): 1119-1131.

- [18] 孙继松. 短时强降水和暴雨的区别与联系[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(6): 498-506.
Sun Jisong. Difference and relationship between flash heavy rain and heavy rainfall[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2017, 36(6): 498-506.
- [19] 张小玲, 湛芸, 张涛. 对流天气预报中的环境场条件分析[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 642-654.
Zhang Xiaoling, Chen Yun, Zhang Tao. Meso-scale convective weather analysis and severe convective weather forecasting[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 70(4): 642-654.
- [20] 高晓梅, 俞小鼎, 王令军, 等. 鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析[J]. 气象学报, 2018, 76(2): 196-212.
Gao Xiaomei, Yu Xiaoding, Wang Lingjun, et. al. Characteristics of environmental parameters for classified severe convective weather in central area of Shandong Province[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2018, 76(2): 196-212.
- [21] 史纬恒, 王磊, 韩飞, 等. 聊城地区强对流天气预报模型的对流参数选取研究[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(6): 549-557.
Shi Weiheng, Wang Lei, Han Fei, et al. Study on choosing convection parameters in strong convective weather forecast model of Liaocheng area[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2018, 37(6): 549-557.
- [22] Johns R H, Doswell C A. Severe local storms forecasting[J]. *Weather Forecasting*, 1992, 7(4): 588-612.
- [23] Rasmussen E N, Blanchard D O. A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters[J]. *Weather Forecasting*, 1998, 13: 1148-1164.
- [24] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.
Yu Xiaoding, Zhou Xiaogang, Wang Xiuming. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 70(3): 311-337.

Contrastive Analysis for Environmental Conditions of Three Co-Existence Convective Processes at Qingdao Under the Background of Cold Vortex over North China

MA Yan^{1, 2}, DONG Hai-Ying², HAO Yan², GONG Ming-Xiao³

(1. Qingdao Engineering Technology Research Center for Meteorological Disaster Prevention, Qingdao 266003, China; 2. Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003, China; 3. Jimo District Meteorological Bureau, Qingdao 266200, China)

Abstract: In order to reveal the differences of moisture, unstable conditions and wind vector shears in the processes of flash heavy rain, thunderstorm gale and hailstone, comparative analyses on environmental atmospheric variables by using sounding observations at Qingdao are carried out for the three co-existence convective processes under the background of cold vortex over North China. The influence systems are cold vortex over North China with cold center around 42°N at 500 hPa, low value system and southern jet at 850 hPa as well as surface cyclone. It indicates there were significant differences for environmental atmospheric variables with thunderstorm gale or not, that is, shallow wet layer in the middle and dry in the lower layer was the moisture stratification structure with the weather of thunderstorm gale. On the contrary, the moisture stratification was dryer in the middle and wetter in the low layer for the weather without thunderstorm gale. The convective intensity was determined by the atmospheric stability in the course of weather. The strength of unstable stratification was the strongest with larger temperature difference between 850 and 500 hPa (larger than 30 °C), stronger vertical wind shear at the height of 0~3 km (larger than 12 m · s⁻¹) in the process of flash heavy rain, thunderstorm gales and hailstone coexisting. And the strength of unstable stratification was the weakest for the convective weather with flash heavy rain and gales coexisting. Under the condition of strong unstable stratification and abundance moisture in the low layer, the vertical wind shear at the height of 0~3 km had good significance for the warning of thunderstorm gales and hailstone weathers around the region of Qingdao.

Key words: cold vortex over North China; co-existence convective weathers; environmental conditions; Qingdao weather