

希热娜依·铁里瓦尔地,努尔比亚·吐尼牙孜,王建友.天山南麓一次弱垂直风切变条件下的致灾冰雹成因分析[J].陕西气象,2021(4):9-15.

文章编号:1006-4354(2021)04-0001-07

天山南麓一次弱垂直风切变条件下的致灾冰雹成因分析

希热娜依·铁里瓦尔地^{1,2},努尔比亚·吐尼牙孜^{1,2},王建友²

(1. 中亚大气科学研究中心,乌鲁木齐 830002;2. 喀什地区气象局,新疆喀什 844000)

摘要:利用常规气象观测资料、区域加密自动站风场资料、NCEP $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 再分析资料和喀什多普勒雷达资料,从天气背景、中尺度特征、物理量和雷达回波特征等方面对2018年春末喀什地区岳普湖县发生的一次致灾冰雹天气成因进行分析。结果表明:本次冰雹天气发生在中亚低涡影响的有利环流背景条件下,中尺度切变线、中尺度地面辐合线及中层干冷空气侵入是产生冰雹的触发系统,冰雹发生前大气处于上干冷、下暖湿的不稳定层结;冰雹云具有反射率强、回波顶高、垂直液态含水量大等特点,冰雹发生时垂直累积液态含水量值发生跃变,对判断冰雹的发生具有明显的指示意义;雷达径向速度场上显示有中小尺度气旋性流场存在,气旋性辐合出现的时间、位置与冰雹出现时间、位置有较好的对应关系,风场气旋性辐合有利于上升运动发展形成小冰雹;垂直风廓线(VWP)产品显示此次冰雹发生在较弱的垂直风切变环境下,弱的垂直风切变不利于上升气流和下沉气流的长时间维持,不利于产生大冰雹。

关键词:冰雹;中尺度触发机制;大气稳定度;垂直风切变;雷达回波特征

中图分类号:P458.1212

文献标识码:A

喀什地区岳普湖县位于天山南麓、塔里木盆地西缘、盖孜河下游,气候干燥,属于温带大陆性干旱气候区。地势西高东低,东北部和西南部为戈壁沙漠,西北部和东南部为冲积平原。由于地处绿洲及沙漠边缘,每年强对流天气频繁出现,尤其5—9月出现冰雹频次较高,冰雹引发的气象灾害给当地农业生产和人民生命财产带来严重损失,因此做好冰雹天气的预报监测及预警对该地的开展防雹服务工作有重要指导意义。近年来,新疆气象工作者对南疆的冰雹特征及灾害进行了大量研究,得出了一些成果。张俊兰等^[1-2]对阿克苏地区的强冰雹超级单体风暴的雷达回波进行了细致研究,得出阿克苏地区强冰雹发生时雷达

指标和潜势;张云慧等^[3]对南疆西部中亚低涡背景下造成的两次强冰雹从环境场和物理机制进行了对比分析,揭示了喀什地区冰雹和短时强降水的环境场特征;黄艳^[4-6]从喀什冰雹天气的气候特征、时空分布特征、环境背景和强对流指数等方面进行大量研究,得出了喀什地区冰雹天气气候特征和环境参数;李圆圆^[7]分析了喀什地区一次罕见强冰雹天气的中尺度系统,发现雹区附近的低层到地面在冰雹出现前存在中尺度切变线、地面中尺度低压、涌线等系统,为强冰雹的出现提供了有利的动力条件。前人的上述研究成果为南疆西部冰雹天气的临近预报提供了很好的参考依据。但目前对南疆西部冰雹的研究更多侧重于强冰雹

收稿日期:2020-09-08

作者简介:希热娜依·铁里瓦尔地(1987—),女,维吾尔族,新疆喀什人,学士,工程师,从事短期天气预报业务研究。

通信作者:努尔比亚·吐尼牙孜(1988—),女,维吾尔族,新疆喀什人,学士,工程师,从事短期天气预报业务研究。

基金项目:新疆乌鲁木齐沙漠气象研究所中亚大气科学研究基金(CASS201725)

形成的物理机制和雷达回波特征的分析研究,而对中等强度冰雹的形成成因和预报预测的研究较少。从历年喀什地区冰雹灾情资料统计发现,在弱垂直风切变下造成的冰雹,虽然冰雹直径小,但冰雹持续时间长仍然能造成严重灾害。2018年5月19日喀什地区岳普湖县出现了一次持续时间较长的小冰雹,经过灾情调查发现此次冰雹天气给当地林果业、农牧业生产造成了严重灾害。本文利用常规气象观测资料、雷达资料、区域加密自动站风场资料、NCEP再分析资料等,对此次弱垂直风切变下的冰雹天气从环流背景、中尺度触发机制、物理条件和雷达特征等方面进行了成因分析,以期为本地区此类天气的临近预报预警提供一定的思路。

1 资料选取

选取常规气象资料、喀什区域自动站风场资料、NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料及2018年5月19日喀什多普勒雷达资料等,综合分析喀什地区岳普湖县2018年5月19日在弱垂直风切变条件下产生的致灾冰雹的成因。

2 冰雹概况及灾情

2018年5月19日08时—20日08时(北京时间,下同),喀什平原大部地区出现小到中雨以上降水,偏北部分区域出现雷暴大风、短时强降水、冰雹等强对流天气,强降雨和冰雹发生时段在19日18—21时,其中19:45—20:13岳普湖县3个乡镇先后出现冰雹天气,持续时间约30 min,冰雹最大直径15 mm,造成该地农牧业生产直接经

济损失406.76万元。

3 环流背景及中尺度触发机制

过程前期5月18日20时(图略)500 hPa欧亚区域中高纬度为两脊一槽的环流形势。乌拉尔山至里海、咸海为稳定的高压脊区,中亚一带有低槽活动,西西伯利亚至贝加尔湖受宽广的低槽影响,南疆西部处于低槽底部。19日08时(图1a)里海、咸海至乌拉尔山高压脊持续向东北方向发展,脊前偏北气流不断引导北方冷空气南下补充到西伯利亚槽中,使槽分两段。北段位于北疆到东疆之间,有利于冷空气沿东疆地势较低地带东灌进入南疆盆地;南段西退南压与中亚低槽合并成低涡,低涡南伸至 30°N ,南疆西部处在低涡前部的西南气流中;08—20时中亚低涡东移进入南疆西部与东灌冷空气共同作用影响喀什地区,造成19日傍晚喀什地区岳普湖县的冰雹天气。

从中尺度分析来看(图1b):700 hPa上喀什到阿克苏之间存在中尺度冷式切变,850 hPa喀什到和田之间有明显的风场辐合区;500 hPa南疆西部有显著湿区,中层湿度条件较好;850 hPa南疆盆地东部存在12 m/s偏东急流,有利于冷空气输送和热力不稳定增加。14时地面上(图略),南疆盆地受中心强度为1 000 hPa的热低压控制,喀什偏北地区地面风场呈现出气旋性特征,即存在中尺度地面辐合线。区域加密自动站风场显示,19时南疆盆地至喀什东部有一致的偏东风,而喀什北部一线为西北风,伽师县玉代力克乡极大风速达21.2 m/s,风向辐合区位于岳普湖境内,

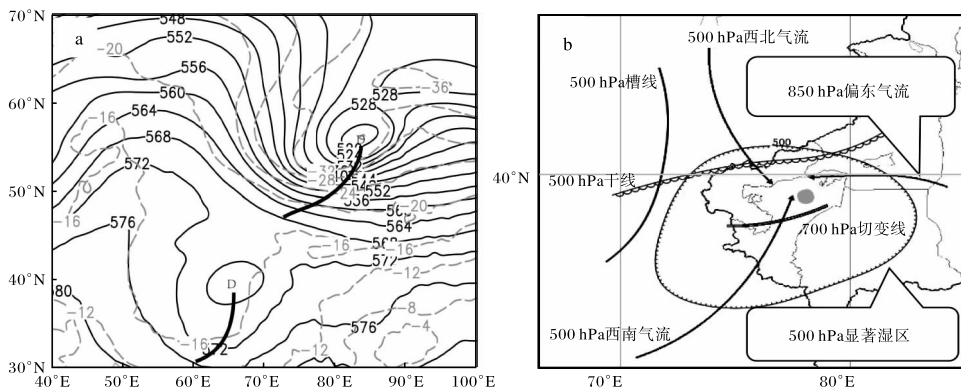


图1 2018-05-19T08 500 hPa 环流形势(a,实线为等高线,单位为 dagpm;虚线为等温线,单位为 $^{\circ}\text{C}$)和中尺度系统分析(b,灰色阴影区为冰雹落区)

对应时刻岳普湖出现明显降水,地面增湿。午后地面升温,近地层储存不稳定能量,随着高空槽逼近,低层切变线东移,500 hPa 上干冷的偏北气流翻越天山侵入喀什地区叠加到低层暖湿气流之上,增强了高低层系统耦合,加剧了大气层结不稳定性,强对流在地面中尺度辐合线附近触发,不稳定能量释放,造成岳普湖的冰雹天气。

4 冰雹发生前物理条件

4.1 不稳定层结和水汽

冰雹爆发前雹区低层均存在潜在不稳定能量累积过程,在外部动力条件具备时,大气潜在不稳定能量得以释放,上升运动发展形成强对流^[8-9]。19 日 08 时南疆西部 $T_{(850-500)}$ 在 $28\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,喀什站 $T_{(850-500)}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明高低层垂直温度递减率强。14 时随着温度的升高 $T_{(850-500)}$ 加大,喀什地区 $T_{(850-500)}$ 达 $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右(图 2a),加剧了上冷下暖的热力不稳定层结,为冰雹的发生提供了热力不稳定条件。假相当位温 θ_{se} 也是表示大气不稳定度的一个重要物理量,随高度升高而减小可以判断有不稳定层结。14 时沿 77°E 做假相当位温和比湿的垂直剖面(2b),可以看到喀什北部 $39^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 在 400 hPa 以下 θ_{se} 随高度减小,说明大气层结不稳定。850~700 hPa 有 θ_{se} 线密集区,

即有高能锋区,332 K 高能中心位于 850 hPa。400~600 hPa 有低能舌伸向南疆西部, $\theta_{se(850-500)}$ 为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明中层有干冷空气侵入。用温度露点差和比湿分析此次强对流天气的水汽条件。降雹当日 08 时喀什偏北地区 700~850 hPa 温度露点差分别为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$,而中高层 500~400 hPa 温度露点差分别为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图略),表明大气处于上湿下干状态,对流层低层空气饱和度和小,湿度条件不好。午后随着 500 hPa 中亚低涡加深东移,低涡前西南气流逐步加强,将低涡本身携带的水汽输送至南疆西部,在冰雹出现前的 18—19 时喀什偏北的英吉沙、岳普湖区域出现明显降水,地面湿度增大,为后期强对流的出现提供了较好的湿度条件。14 时比湿的垂直分布存在南北向的湿度梯度,即喀什南部的叶城山区和浅山区一带比湿达 8 g/kg ,往北递减,冰雹发生地岳普湖比湿在 6 g/kg 左右,这在于旱半干旱地区的春季属于较高值。14—15 时叶城浅山区出现短时强降水,与比湿有较好的对应关系。假相当位温和比湿的垂直分布可以反映出 14 时大气层结已转为中上层干冷、低层暖湿的不稳定状态,冰雹出现在高能高湿区附近。

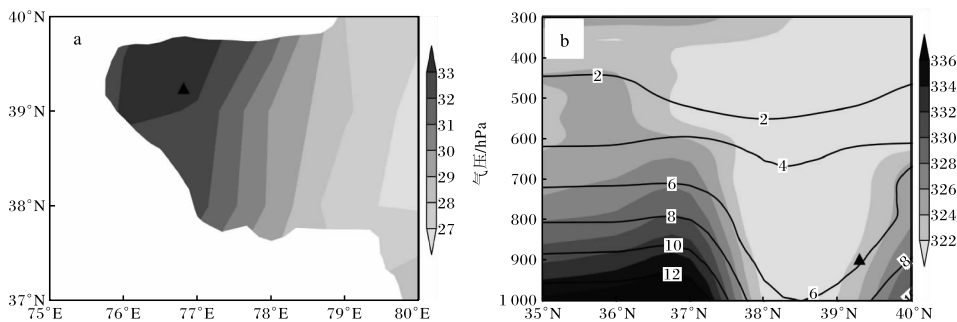


图2 2018-05-19T14 的 $T_{(850-500)}$ (a,单位为 $^{\circ}\text{C}$)和沿 77°E 的比湿 q (实线,单位为 g/kg)及假相当位温 θ_{se} (灰色阴影,单位为 K)的垂直剖面(b)(▲为冰雹落区,白色区域为地形)

4.2 对流指数

研究表明,K 指数、SI 指数、CAPE(对流有效位能)值能很好地反映测站上空大气层结状态,CAPE 值越大,其能量释放后形成的上升气流强度越强,降雹的可能性就越大^[10]。因冰雹发生地岳普湖没有探空测站,故选用离雹暴发生地最近

的喀什市探空测站的探空资料来分析岳普湖上空的大气层结条件。由于雹暴发生在午后至傍晚,为了能真实反映对流天气发生前后的环境场,采用当日 14 时地面和露点温度对 08 时探空资料进行订正,进而提高探空数据对此次冰雹天气的指示性。从 19 日喀什探空图(图 3,图见第 13 页)

和对流参数的变化(表 1)可以看出,冰雹发生前(08 时)喀什本站 CAPE 值为 0 J/kg, K 指数为 24 ℃, SI 指数为 1.41 ℃, 大气层结较稳定, 订正后(14 时)CAPE 值突增到 1 180 J/kg, 不稳定能量迅速增长, K 指数升至 32.3 ℃, 增幅 8.3 ℃, SI 指数降到 -4.0 ℃, 说明 14 时的大气层结非常不稳定, 有利于强对流发生。

表 1 2018-05-19 喀什站探空对流参数

时刻	K 指数/℃	SI 指数/℃	CAPE 值/(J/kg)	0℃层高度/m	-20℃层高度/m
08 时	24.0	1.41	0	3 775	6 555
14 时	32.3	-4.0	1 180	—	—

注:— 表示 14 时无该项订正数据

4.3 特征层高度

黄艳等^[4]对 2001—2012 年喀什地区发生的冰雹天气的 0 ℃和 -20 ℃高度进行统计分析, 得出适宜的 0 ℃层和 -20 ℃层高度有利于产生冰雹; 两者之间的厚度越小越有利于产生大雹。通过表 1 可见, 冰雹发生前(19 日 08 时)0 ℃层高度为 3 775 m, 在 600 hPa 附近; -20 ℃层高度为 6 555 m, 在 400 hPa 附近, 两个特殊层之间的厚度为 2 780 m, 0 ℃和 -20 ℃层高度适宜, 有利于冰雹的生成。

5 雷达回波特征

5.1 组合反射率、回波顶高、液态含水量

19 日 18:03 在岳普湖东部和西南部形成两个回波单体, 其中最强回波单体强度为 45 dBz, 回波高度达 6.2 km, 周边不断有新的回波单体生成并与之合并; 19:16 回波继续发展加强, 面积扩大, 强度达 57 dBz, 回波高度伸展到 10 km, VIL 值为 18 kg/m², 这时岳普湖境内已经开始降水。19:22—19:44 岳普湖南部的回波向东北方向移动与偏东的回波单体合并, 回波强度明显增强, 在岳普湖南部到伽师总场形成带状分布的多单体风暴。从冰雹出现时段 19:50—20:01 的回波特征(图 4, 见第 13 页)来看, 19:50 岳普湖境内强单体回波继续发展, 最强中心超过 55 dBz, 回波顶高

达 12 km, VIL 值跃增至 39 kg/m²。该时次强回波单体结构密实, 回波梯度加大, 呈现出典型的强对流单体结构, 降水加强, 19:48—19:53 岳普湖出现了第一时段冰雹, 直径 10 mm。19:56—20:01 回波继续加强, 该时次强对流发展最旺盛, 冰雹云回波强度达 61 dBz, 回波顶高升至 13.7 km, VIL 值增到 43 kg/m², 19:58—20:05 出现了第二时段冰雹, 最大冰雹直径达 15 mm。20:07—20:18 冰雹云最强回波强度降到 55 dBz, 回波顶高降到 10 km 左右, VIL 值减小到 33 kg/m², 带状回波特征已不明显, 但是仍然有利于小冰雹的出现, 20:09—20:13 出现了第三时段冰雹。20:24 后回波开始东移减弱, 强回波面积减小, 同时 VIL 值减小、回波顶高度下降, 回波逐渐移出岳普湖境内, 冰雹结束。

5.2 反射率因子垂直剖面

对 19:56 最强回波中心的组合反射率因子做任意方向的垂直剖面(图 5), 图上呈现出典型的悬垂回波、回波墙、弱回波区等对判断冰雹有指示性意义的回波结构特征, 表示风暴具有降雹的潜势。6 km 高度上有悬垂回波, 60 dBz 强回波高度伸展到 0 ℃层(3.8 km)以上, 50 dBz 强回波高度超过 6 km, 接近 -20 ℃层高度, 这种结构特征有利于冰雹的形成。剖面图上还可以看出大于 60 dBz 强回波中心已接地, 表征该地区已开始降雹。

5.3 基本径向速度

19 日 19:56 在 2.4°仰角的径向速度图(图 6)上, 强回波中心对应位置观察到大片的正速度区中包含着小范围的负速度区。雹区位置有明显的气旋性辐合型速度对, 直径小于 10 km, 从 1.5°仰角伸展到 2.4°仰角。其中 2.4°仰角上最为明显, 旋转速度为 18 m/s(单体离雷达距离 90 km), 垂直延伸厚度小于风暴垂直尺度的三分之一, 并维持了 2 个体扫, 类似于中气旋的结构特征, 强回波对应的区域有风的径向辐合。以上特征出现的时间、位置与冰雹出现的时间、位置较吻合。风场的气旋式辐合有利于上升气流的维持和增强, 在有利的环流背景下形成了小冰雹。

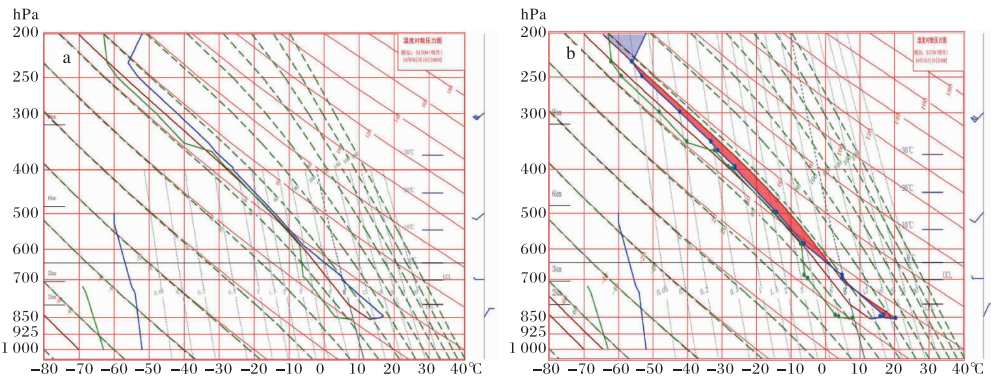


图3 2018-05-19(a 08时)和订正后(b 14时)喀什站探空资料(文见第11页)

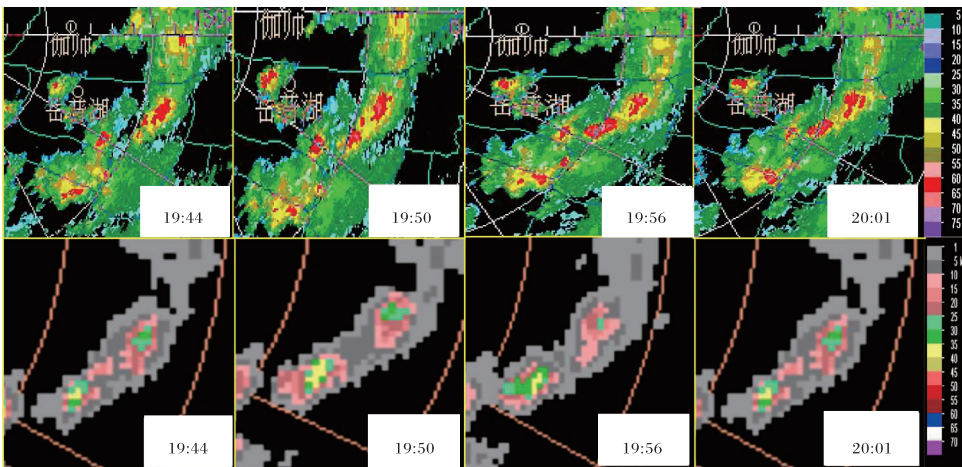


图4 2018-05-19T19:44—20:01 雷达组合反射率因子与垂直液态含水量(文见第12页)

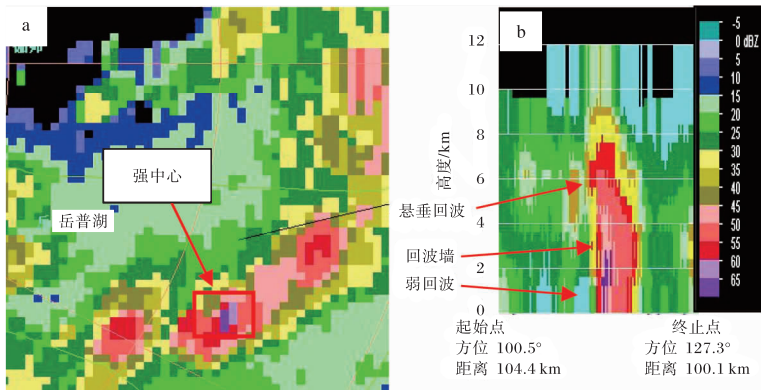


图5 2018-05-19T19:56 组合反射率因子(a)及强回波中心垂直剖面(b)(文见第12页)

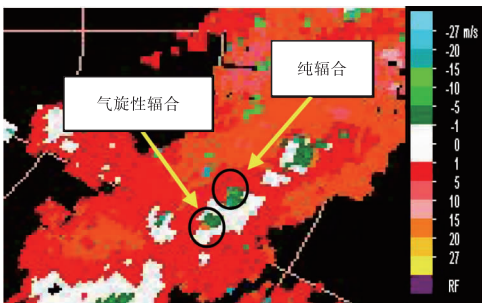


图6 2018-05-19T19:56 2.4°仰角径向速度

5.4 垂直风廓线产品(VWP)

利用垂直风廓线产品分析这次冰雹天气0～6 km的垂直风切变的演变。一般来说垂直风切变的大小和形成风暴的强弱有密切的关系。在满足一定的热力不稳定条件下,垂直风切变的增强将导致风暴的进一步加强和发展^[10]。

从冰雹发生前后时刻的风廓线图(图7)可以看出,19:34低层有偏东风,0～6 km风速切变为

6 m/s, 5.2 km 处有偏西气流。19:39 偏西气流转为西北气流并厚度增加, 高度下降至 4.3 km, 说明中层有干冷空气入侵。19:44 在 4.6~8.5 km 为一致的西南风, 风随高度逆时针旋转有冷平流; 低层 0.3~0.6 km 存在东风与南风的风向切变, 风向随高度顺时针旋转有暖平流; 0~6 km 风速垂直切变增加到 10 m/s。这种上冷下暖的垂直差动平流造成的静力不稳定层结和不断增强的垂直风切变有利于强对流的发展, 是激发此次冰雹天气产生的重要环境条件之一, 对应的

19:48—19:53 出现了第一时段冰雹。19:56 在 0.6~1.2 km 之间风向顺时针旋转切变了 180°, 风速切变达 4 m/s, 0~6 km 的风速切变继续增大, 达到了 12 m/s, 可以判断此时出现强对流的可能性较大, 对应的 19:58—20:05 出现了第二时段冰雹。20:07 在 0.6~1.2 km 之间风向切变 90°, 高低层的风速切变减小到 10 m/s, 20:09—20:13 出现了第三时段小冰雹。后期随着中高层风速的减小和垂直风切变减弱, 对流强度也开始减弱, 冰雹结束。

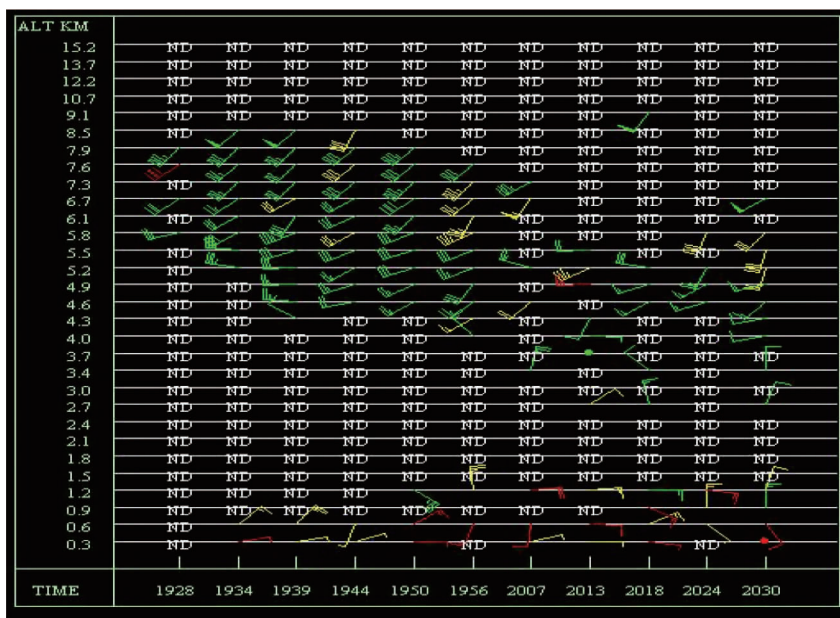


图7 2018-05-19 冰雹出现前后垂直风廓线产品

垂直风切变的演变来看, 这次冰雹过程 0~6 km 的垂直风切变最强时达到了 12 m/s, 属于较弱垂直风切变, 说明动力不稳定条件不足, 不利于大冰雹的产生, 这也是这次冰雹直径小于 2 cm 的重要原因。

6 结论

(1) 这次冰雹天气发生在中亚低涡和东灌冷空气的有利环流背景条件下。700~850 hPa 中尺度切变线、中尺度地面辐合线以及对流不稳定条件共同促使冰雹天气过程的发生发展。

(2) 持续减小的 SI 指数、持续增大的 K 指数表明当时大气层结变得非常不稳定, 有利于强对流发生; 强的温度垂直递减率、迅速增大的对流有效位能, 为此次冰雹的出现提供了大气不稳定条

件。适宜的 0 °C 层和 -20 °C 层的高度有利于冰粒的增长, 从而形成冰雹。

(3) 冰雹发生时雷达回波表现出冰雹单体反射率强、强回波持续时间长、回波顶高等特点, 冰雹发生时 VIL 值发生跃变, 这一变化规律对判断冰雹的发生具有明显的指示意义。在反射率因子垂直剖面图上出现回波墙、悬垂回波以及弱回波区等冰雹特征结构。在径向速度场中发现有中小尺度气旋性流场存在, 气旋性辐合出现的时间、位置与冰雹出现时间、位置有较好的对应关系。

(4) 通过对垂直风廓线产品分析可以得出, 这次冰雹天气发生在较弱的垂直风切变的环境条件下, 不利于形成大冰雹, 这也是冰雹直径小于 2 cm 的原因之一。

参考文献:

- [1] 张俊兰. 南疆 2011 年 5 月一次强冰雹天气的综合分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 1119-1126.
- [2] 张俊兰, 罗继. 新疆天山南麓一次冰雹天气成因分析[J]. 气象科技, 2012, 40(3): 436-444.
- [3] 张云慧, 谭艳梅, 于碧馨, 等. 中亚低涡背景下南疆西部两次强冰雹环境场对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(4): 10-16.
- [4] 黄艳, 裴江文. 新疆喀什地区冰雹天气气候特征及大气环境背景分析[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 526-532.
- [5] 黄艳, 裴江文, 胡素琴, 等. 新疆喀什两次超级单体致雹风暴特征对比分析[J]. 气象科学, 2013, 33(6): 693-700.
- [6] 黄艳, 裴江文. 2012 年新疆喀什一次罕见冰雹天气的中尺度特征[J]. 干旱气象, 2014, 32(6): 989-995.
- [7] 李圆圆, 支竣, 张超. 2013 年 6 月喀什地区一次强冰雹天气的成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(2): 19-26.
- [8] 魏永, 彭军, 热苏力·阿不拉, 等. 新疆天山北坡中部一次冰雹天气成因分析[J]. 干旱气象, 2013, 31(4): 771-774.
- [9] 魏永, 雷微, 王存亮, 等. 石河子地区三次冰雹天气过程的综合分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(1): 21-28.
- [10] 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: 93-96.
- [11] 王春玲, 崔力, 杜丽娅, 等. 2017 年早春濮阳市一次冰雹过程诊断分析[J]. 陕西气象, 2019(3): 30-34.
- [12] 张磊, 张继东, 热苏力·阿不拉. 新疆阿克苏冰雹天气的判识指标研究[J]. 干旱气象, 2014, 32(4): 629-635.
- [13] 郭兰. 三门峡一次致灾冰雹过程的中尺度分析[J]. 陕西气象, 2018(4): 18-22.
- [14] 张晶, 姚文, 孙丽红, 等. 营口地区 3 次致灾性冰雹过程对比分析[J]. 陕西气象, 2017(3): 6-11.
- [15] 希热娜依·铁里瓦尔地, 阿依仙木古丽·阿布来提, 王鹏飞. 雷达卫星资料在喀什地区预报业务服务中的应用[J]. 农业与技术, 2019, 39(10): 139-140.
- [16] 张晶, 姚文, 何晓东, 等. 营口一次百年一遇大冰雹天气过程分析[J]. 陕西气象, 2018(3): 7-10.
- [17] 王莉萍, 张湃, 崔晓东, 等. 一次后倾槽型冰雹天气过程演变的诊断分析[J]. 暴雨灾害, 2010, 29(3): 239-244.
- [18] 玛依热·艾海提, 亚森江·买买提, 希热娜依·铁里瓦尔地. 2014 年夏季喀什一次强冰雹过程分析[J]. 陕西气象, 2016(3): 6-11.
- [19] 陈红霞, 吕作俊, 姬鸿丽. 豫西地区一次冰雹天气多普勒雷达资料分析[J]. 气象与环境科学, 2007, 30(3): 65-69.
- [20] 李斌, 苏晓岚, 王志龙, 等. 南疆塔里木盆地西部一次强冰雹天气过程分析[J]. 干旱气象, 2013, 31(4): 790-795.
- [21] 张磊, 张继韞. 一次局地强冰雹的多普勒雷达回波特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(4): 26-30.
- [22] 毕潇潇, 胡忠明, 孙妍, 等. 2016 年初夏吉林省一场强对流天气过程分析[J]. 气象灾害防御, 2016(4): 16-20.