

新疆图木舒克市冰雹天气的环流背景和判识指标分析

陈艳丽¹, 姜爱红^{2*}, 周雪英³, 秦榕⁴, 任东²

¹新疆铁门关市气象局, 新疆 铁门关

²新疆图木舒克市气象局, 新疆 图木舒克

³新疆巴音郭楞蒙古自治州气象局, 新疆 库尔勒

⁴新疆气象信息中心, 新疆 乌鲁木齐

Email: 25969195@qq.com, 1163404382@qq.com

收稿日期: 2020年9月6日; 录用日期: 2020年9月21日; 发布日期: 2020年9月28日

摘要

根据新疆图木舒克市及其辖区内2012~2019年近8a来区域自动气象站常规资料、NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料, 总结分析了新疆图木舒克市及其辖区内冰雹天气的影响系统和环流形势; 并利用CINRAD/CC型雷达图像产品对该区域近8a 23个冰雹天气个例进行了统计分析, 归纳出新疆图木舒克市及其辖区内冰雹天气的雷达图像产品判识指标。结果表明: (1) 新疆图木舒克市冰雹天气的3类影响系统和环流形势有: 巴尔喀什湖低槽型、中亚低槽(涡)型、锋区短波槽型。(2) 当满足 $K \geq 23^\circ\text{C}$ 、 $T850\text{ hPa}-T500\text{ hPa} \geq 32^\circ\text{C}$, 假相当位温 $\geq 330^\circ\text{C}$, 具有一定的对流有效位能(CAPE值), 适宜的 0°C 层和 -20°C 层高度, 可作为判断该区域是否出现冰雹的环境场条件。(3) 新疆图木舒克市及其辖区内冰雹天气的雷达图像产品判识指标为: 组合反射率因子(CR) $\geq 50\text{ dBZ}$ 以上, 强回波中心($45\sim 50\text{ dBZ}$)的高度 $\geq 7\text{ km}$; 6~8月冰雹云的回波顶高(ET) $10\sim 12\text{ km}$; 径向速度场V常伴有逆风区, 逆风区平均厚度4000米, 具有风暴顶辐散特征; 径向速度垂直剖面(RCS)出现垂悬回波、有界弱回波区(BWER)等特征回波; 垂直风廓线产品(VWP)从低层到中层出现风向、风速的垂直切变特征; 云体垂直累积液态水含量5月VIL $\geq 20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 6~8月VIL $\geq 30\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 且VIL在测站降雹前具有跃增增长现象; 冰雹指数产品(HI)至少持续5个体扫出现实心大三角标识。

关键词

图木舒克市, 环流形势, 单体风暴, 判识指标

Analysis of the Circulation Background and Identifying Indicators of Hail in Tumxuk City, Xinjiang

*通讯作者。

文章引用: 陈艳丽, 姜爱红, 周雪英, 秦榕, 任东. 新疆图木舒克市冰雹天气的环流背景和判识指标分析[J]. 气候变化研究快报, 2020, 9(5): 588-595. DOI: 10.12677/ccr.2020.95065

Yanli Chen¹, Aihong Jiang^{2*}, Xueying Zhou³, Rong Qin⁴, Dong Ren²

¹Meteorological Bureau of Tiemenguan City, Tiemenguan Xinjiang

²Meteorological Bureau of Tumushuke City, Tumushuke Xinjiang

³Meteorological Bureau of the Bayingolin Mongol Autonomous Prefecture, Korla Xinjiang

⁴Xinjiang Meteorological Information Center, Urumqi Xinjiang

Email: 25969195@qq.com, *1163404382@qq.com

Received: Sep. 6th, 2020; accepted: Sep. 21st, 2020; published: Sep. 28th, 2020

Abstract

The effect systems and circulation patterns of hail in Tumxuk City, Xinjiang and the area under its jurisdiction were summarized and analyzed according to daily data in the nearly 8 years from 2012 to 2019 from the regional automatic weather station and the NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data. Then, a CINRAD/CC radar image product was used for a statistic analysis of 23 hail cases collected from the region during the 8 years. The results show that (1) there are three hail effect systems and circulation patterns in Tumxuk: a Balkhash Lake low trough, Central Asia low trough (vortex), and frontal zone short-wave trough. (2) With $K \geq 23^\circ\text{C}$, $T_{850\text{ hPa}}-T_{500\text{ hPa}} \geq 32^\circ\text{C}$, and pseudo-equivalent potential temperature $\geq 330^\circ\text{C}$, there is certain convective available potential energy (CAPE) between the 0°C height and -20°C height, and it is practical to judge that the region is an environment field for hail. (3) The following are the identifying indicators in the radar image product for hail in Tumxuk and the area under its jurisdiction: composite reflectivity factor (CR) $\geq 50\text{ dBZ}$, strong echo center (45 - 50 dBZ) height $\geq 7\text{ km}$; the echo top (ET) of hail clouds from June to August is 10 - 12 km; the radial velocity field V is often accompanied by an adverse wind zone whose average thickness is 4,000 m and which is characterized by storm top divergence; characteristic echoes, such as overhang echoes and bounded weak echo regions (BWER), appear on the radar cross-section (RCS); the vertical wind profile (VWP) is characterized by vertical shear and velocity from the lower layer to the middle and upper layers; the vertically integrated liquid water content VIL $\geq 20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ in May and VIL $\geq 30\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ in June to August. Moreover, the VIL tends to jump strongly before hail appears at the survey station; a large, solid triangle identifier appears in at least 5 sweep volumes of the hail index (HI).

Keywords

Tumxuk City, Circulation Patterns, Cell Storms, Identifying Indicators

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

新疆生产建设兵团第三师图木舒克市是新疆棉花、粮油及瓜果的主要生产基地之一，因地表性质差异悬殊，冰雹、局地短时强降水、大风沙尘等气象灾害频繁，每年发生的各类气象灾害给当地的农业生产和人民群众的生活都造成了一定经济损失，制约了当地经济的可持续健康发展。因此，做好该区域冰雹、短时强降水等强对流性天气的短临预报预警，是提升本地区人影防灾减灾能力的关键和基础。国内

诸多气象学者针对各区域冰雹天气的气候特征、环流背景、雷达图像产品特征等方面做了大量研究[1] [2] [3] [4] [5]。近年些,南疆地区作为新疆的强对流性天气高影响区域之一,气象防灾减灾形势日益严峻,新疆气象学者则针对发生在新疆不同区域的局地短时强降水、冰雹等强对流性天气的成因进行了分析[6] [7] [8] [9] [10];与此同时,有些学者对冰雹潜势预报及预警指标深入研究[11] [12] [13]。本文在其他气象学者的研究基础上,参照文献中的系列分析方法,重点分析新疆图木舒克市及其辖区冰雹天气的环流背景和多普勒天气雷达图像产品特征,从气候学角度揭示本区域冰雹天气的发生规律,分析本辖区内新一代天气雷达冰雹天气的雷达图像产品判识指标,为辖区内冰雹的预报预警方法研究及人工影响天气作业提供科技支撑,以期实现研判精准、预警及时、气象防灾减灾能力增强的长效防控格局。

2. 冰雹天气的影响系统和环流形势

冰雹天气属于中小尺度天气系统范畴,是在特定的大气环流背景下与中小尺度系统共同作用下而产生的[14] [15]。在大气环流背景下而产生的影响系统的分析是冰雹天气预报预警的关键。本文依据 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 及区域自动气象站常规资料,利用 GrADS 绘图软件绘制了冰雹个例的 500 hpa 高空天气图,总结分析了 2012~2019 年新疆图木舒克市及其辖区内近 8a 冰雹天气过程的影响系统,并对其环流形势进行了分型(图 1)。

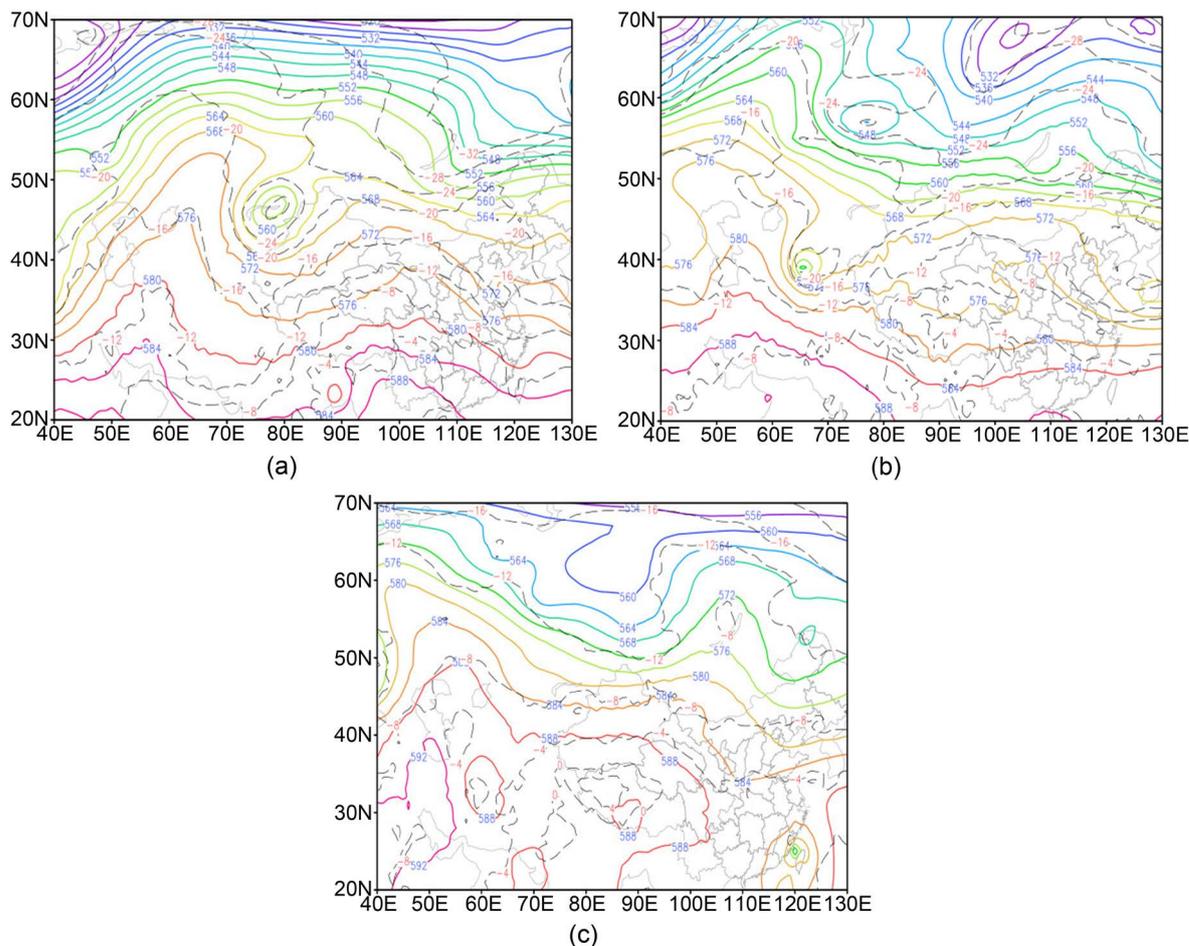


Figure 1. 500 hpa height field (solid line, gpm) and temperature field (dotted line, °C). (a) Balkhash Lake low trough; (b) Central Asia low trough (vortex); (c) Frontal zone short-wave trough

图 1. 500 hpa 高度场(实线, gpm)和温度场(虚线, °C)。 (a) 巴尔喀什湖低槽型; (b) 中亚低槽(涡)型; (c) 锋区短波槽型

2.1. 巴尔喀什湖低槽型

此类环流形势主要以经向环流为主, 乌拉尔山至里海为高压脊区, 西西伯利亚地区为低槽活动区, 其槽前有分裂短波活动, 移至巴尔喀什湖地区时切出低槽或低涡。巴尔喀什湖低槽(涡)属于北支影响系统, 在欧亚范围内 $43^{\circ}\sim 53^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\sim 85^{\circ}\text{E}$ 出现的低槽称为巴尔喀什湖低槽, 槽底可南伸至 40°N , 槽线不超过 40°N 。若此时新疆为弱脊发展, 此类环流形势有利于新疆图木舒克市及其辖区内冰雹天气的发生。近 8 a 来辖区内冰雹天气共出现此影响系统 9 次, 占 39.2%。

2.2. 中亚低槽(涡)型

此类环流形势主要以经向环流为主, 前期乌拉尔山高压脊发展旺盛, 且位置稳定少动。欧亚 $35^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$ 范围内脊前低槽(涡)发展, 槽底南伸至 40°N 以南区域。随着里海脊发展, 推动脊前低槽(涡)东移, 当新疆西部位于槽底前部时, 该系统造成新疆图木舒克市及其辖区内的冰雹天气。近 8 a 来辖区内冰雹天气共出现此影响系统 8 次, 占 34.8%。

2.3. 锋区短波槽型

此类天气系统在欧亚范围内多呈纬向环流, 副热带锋区主体位于 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, 气压梯度和温度梯度较大, 随着锋区加强东移, 槽前不断分裂短波并影响南疆地区, 南疆西部国境线外有低压发展, 南疆位于低压底部锋区上, 此类天气系统造成图木舒克市及其辖区内冰雹天气的发生。近 8 a 来辖区内冰雹天气共出现此影响系统 6 次, 占 26%。

3. 冰雹天气发生前的环境条件

3.1. 资料来源和方法

国内诸多学者都利用雷达图像产品分析、总结出关于各区域内的冰雹预警研究成果, 结果表明: 在我国不同地区, 即使应用同一种雷达图像产品, 总结出的冰雹云判识标准及预警指标也差异较大。本中在上述研究基础上, 选取 2012~2019 年新疆图木舒克市及其辖区内 23 次有连续雷达监测资料的冰雹个例天气过程, 应用新疆图木舒克市($79^{\circ}05'09''\text{E}$, $39^{\circ}52'16''\text{N}$)新一代天气雷达图像产品以及常规探空资料, 对其辖区内冰雹天气的物理量场和雷达图像特征进行分析和研究, 运用统计方法, 分析适合于新疆图木舒克市新一代天气雷达冰雹天气的判识指标, 为提高辖区内冰雹的预报预警能力和人工防雹减灾作业指挥提供有效参考。

3.2. 物理量特征分析

利用位于该区域内的代表探空站喀什站 08 时的探空资料对新疆图木舒克市及其辖区内冰雹天气的物理量阈值进行统计, 结果表明 4 个指标在本区域内冰雹天气过程的预报有一定参考价值和指示意义。

Table 1. Atmospheric properties of hail cases collected from Tumxuk from 2012 to 2019

表 1. 2012 年至 2019 年新疆图木舒克辖区内冰雹个例天气的大气物理参量

物理量参量	K 指数/ $^{\circ}\text{C}$	假相当位温 ($^{\circ}\text{C}$)	CAPE ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	垂直风切变 (m/s)	T850-T500 ($^{\circ}\text{C}$)	0 $^{\circ}\text{C}$ 层高度(m)	
						5 月	6~8 月
平均值	23.1	338.2	466.6	4.5	32.2	3937	5000
最大值	34	408	1383	12	36	4155	4500

通过统计分析 2012~2019 年图木舒克市及其辖区近 8 a 冰雹天气的大气物理参量, 从表 1 可看出: 当冰雹天气发生时, K 值平均值为 23.1℃, 850 hpa 与 500 hpa 的中低层温差为 32℃, 0~6 km 存在的垂直风切变, 假相当位温 $\geq 330^\circ\text{C}$; CAPE 值的分布离散度较大, 如 2016 年 8 月 9 日、2018 年 7 月 2 日冰雹个例的 CAPE 值分为 1383 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、1139 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$, 但是也有部分冰雹个例天气 CAPE $< 10 \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。因此, CAPE 值的大小可作为未来强对流性天气潜势预报的度量之一, 但不能作为冰雹有效的预警指标。

4. 冰雹天气的雷达图像产品判识指标

4.1. 组合反射率因子图像产品(CR)

组合反射率因子是在一个体扫中, 将常定仰角方位扫描中发现的最大反射率因子投影到笛卡尔格点上的产品[14]。经统计分析, 降雹前 15~30 min, 冰雹个例的组合反射率因子强度 CR 在 45~55 dBz, 且 $\text{CR} \geq 50 \text{dBz}$ 达 83%。

4.2. 垂直液态水含量图像产品(VIL)

云体垂直累积液态含水量(VIL)表示将反射率因子数据转换成等价的液态水值, 是假设所有反射率因子返回都是由液态水引起, 通过经验关系得到的。经统计分析: 冰雹个例中, $\text{VIL}_{\text{max}} \geq 15 \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 有 7 例, 占 32.6%; $20 \text{kg}\cdot\text{m}^{-2} \geq \text{VIL}_{\text{max}} \leq 35 \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 有 12 例, 占 51.4%; $\text{VIL}_{\text{max}} \geq 35 \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 有 4 例, 占 16%。5 月的 $\text{VIL} \geq 20 \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 相对较低, 也易造成冰雹, 这与春末夏初该区域特殊的气候条件、0℃层和-20℃层高度较低有关。跃增定义为 VIL 值在 5 个体扫时间内至少增加 10 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 且跃增后 VIL 值超过 30 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。共有 16 个例冰雹过程中的 VIL 值在降雹前出现跃增增长现象, 如 2014 年 6 月 16 日, 图木舒克市 50 团辖区内出现强单体风暴, 其 VIL 值在 18:40~19:25, 从 15 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 跃增至 30 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 最大值达 33 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

综上所述: 与其他地区的研究结果相比, 新疆图木舒克市的冰雹云 VIL 判别阈值相对较低。因此, 可将组合反射率因子 $\text{CR} \geq 50 \text{dBz}$ 、 $\text{VIL} \geq 30 \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (5 月 $\geq 20 \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 定为新疆图木舒克市辖区冰雹的预警指标之一。因收集到的冰雹样本不够全面, 此项指标还需在今后的经验累计中进行修正和细化。

4.3. 基本径向速度图像产品(V)

分析径向速度产品发现, 冰雹云形成时常伴有明显的风切变。如 2014 年 6 月 10 日 0.5°、1.5°和 2.4°仰角的径向速度产品, 如图 2 所示, 在不同仰角的径向速度图上均出现大风速核区, 且前沿风速梯度较大, 存在风向的突变。2.4°仰角负径向速度区中心最大值为-20 m/s, 正速度区中心最大值为+27 m/s, 且存在风向的辐合。从低层到高层存在西北风转西南风的切变, 其结构呈“S”型的暖平流结构, 风随高度顺时针旋转, 表明低层有暖平流, 具有辐合流场。这种风场特征表明上升气流较强, 有利于风暴单体上升气流的维持和能量输送, 有利于冰雹的形成和增长。

径向速度产品中出现的“逆风区”表明冰雹云体内存在较强的上升气流, 而逆风区厚度越高, 上升气流则越强, 易造成强冰雹天气发生, 且逆风区对应着反射率因子梯度大值区。逆风区, 即在径向速度图上成片的正速度区(负速度区)中出现小范围负速度区(正速度区) [15]。统计分析冰雹个例天气降雹前 15~30 min 的径向速度图像产品(V)和垂直风廓线产品(VWP), 发现部分强冰雹个例从低层到高层在 2~8 km 高度存在逆风区, 平均厚度在 4000 m 左右。通过分析冰雹个例天气中的 5 个仰角的体扫资料, 当逆风区的厚度超过 3000~5000 m 时, 均出现了较强的冰雹天气。

4.4. 垂直风廓线产品(VWP)

通过分析冰雹个例降雹时的垂直风廓线(VWP)产品, 发现从低层到高层均出现明显的风向、风速切变。如 2014 年 6 月 16 日、2015 年 6 月 30 日、2019 年 6 月 19 日(图略)等冰雹个例的雷达径向速度图像

产品, 选取 3~5 km 高度的图像资料分析发现, 中低层存在明显的气旋性辐合, 说明冰雹云发展强盛, 也有利垂直上升运动发展以及低层水汽源源不断地向上输送。因此, 速度场中的风场辐合、气旋性辐合、逆风区可作为冰雹天气识别与预警的参考指标。

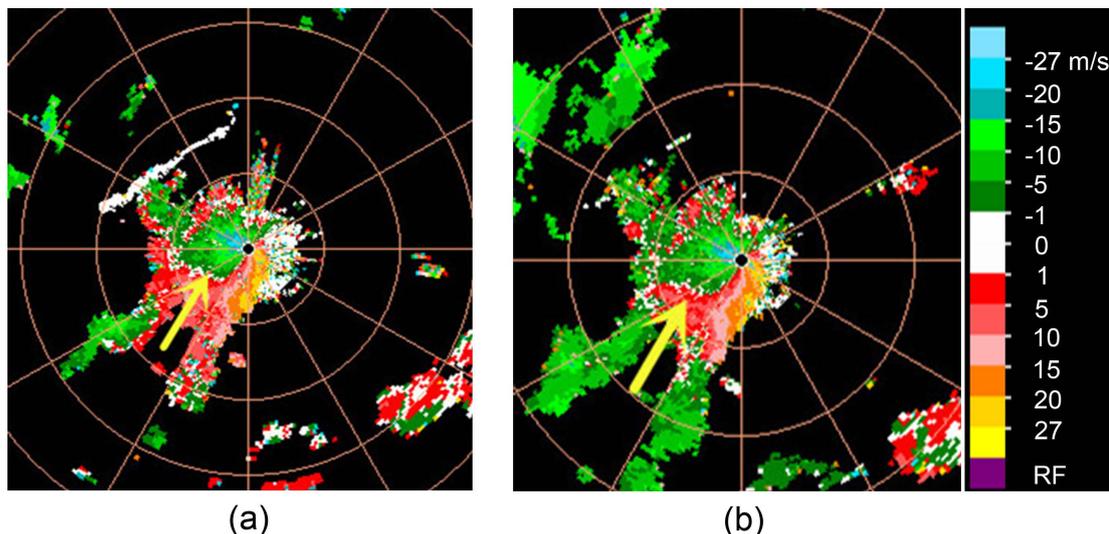


Figure 2. Shear characteristics of velocity pair and wind direction and velocity shown by the VPPI velocity field at 20:27 on June 10, 2014. (a) 1.5° Elevation angle; (b) 2.4° Elevation angle

图 2. 2014 年 6 月 10 日 20:27 VPPI 速度场所示速度对和风向风速切变特征。(a) 1.5° 仰角; (b) 2.4° 仰角

4.5. 反射率因子垂直剖面图产品(RCS)

反射率因子垂直剖面图像产品(RCS)可以看出对流单体风暴反射率因子的垂直分布, 还可监测到反射率因子最强中心的对流发展高度, 对于冰雹的监测预警起到很好的指示意义。如 2015 年 6 月 30 日 53 团 21:26 的反射率因子垂直剖面图可看出(图略), 在对流单体入流一侧的反射率因子梯度为最大, 中层 > 20 dBZ 的回波廓线逐渐向低层入流伸展, 并且悬垂于低层弱回波之上; 从低层到中层反射率因子的垂直剖面看有垂悬回波、弱回波区(WER)存在, 50 dBZ 强回波中心的高度上升至 7~8 km, 整个回波顶高达到 10 km, 已形成较为明显的冰雹云结构, 对应的地面图木舒克市 53 团出现了冰雹天气, 给该区域的棉花带来不同程度的损失。

4.6. 回波顶高产品(ET)

回波顶高(ET)是云体内上升气流发展强度的重要参数之一。因冰雹云中强烈的、有组织的上升气流加剧了云体在垂直方向的发展, 所以冰雹云的回波顶高明显高于其它云体。统计 2012~2019 年新疆图木舒克市辖区内冰雹个例天气结果表明, 在冰雹云发展旺盛及主要降雹时间段内, 冰雹云 ET 在 10~13 km, 23 个冰雹个例中占 81%。图木舒克市及其辖区冰雹云的回波顶高最高出现在 6~8 月, 冰雹云的回波高度超过 11 km, ETmax ≥ 12 km; 5 月和 9 月的 ET 略低。可见, 冰雹云顶高度随季节不同而发生变化, 将其与组合反射率因子相结合进行分析, 则更加有利于判识冰雹云。

4.7. 冰雹指数(HI)

冰雹指数(HI)产品是冰雹探测算法(HDA)的图形输出结果, 以判断产生冰雹、强冰雹的可能性。在 23 冰雹个例中, 每次强冰雹天气过程中 HI 均出现了实心大三角标识, 且此标识最少持续出现 5 个体扫。

如 2014 年 6 月 10 日、2014 年 6 月 16 日的 HI 产品图上均持续 5~7 个体扫出现实心三角标识;对应实况, 辖区内部分农牧团场出现了冰雹。因此, 冰雹指数 HI 对冰雹预警具有指示意义, 当实心大三角标识持续出现 5 个以上体扫时, 降雹可能性较大, 防雹指挥人员应高度重视。

5. 结论

(1) 新疆图木舒克市冰雹天气的 3 类影响系统和环流形势有: 巴尔喀什湖低槽型、中亚低槽(涡)型、锋区短波槽型。

(2) 当物理量参数满足 $K \geq 23^{\circ}\text{C}$ 、 $T_{850\text{ hPa}}-T_{500\text{ hPa}} \geq 32^{\circ}\text{C}$, 假相当位温 $\geq 330^{\circ}\text{C}$, 具有一定的对流有效位能(CAPE 值), 适宜的 0°C 层和 -20°C 层高度, 可作为判断该区域是否出现冰雹的环境场条件。

(3) 新疆图木舒克市及其辖区内冰雹天气的判识指标为: 组合反射率因子(CR) $\geq 50\text{ dBZ}$ 以上; 强回波中心($45\sim 50\text{ dBZ}$)的高度 $\geq 7\text{ km}$; 6~8 月冰雹云的回波顶高(ET) $10\sim 12\text{ km}$ 。径向速度场 V 常伴有逆风区, 逆风区平均厚度 4000 m , 具有风暴顶辐散特征; 径向速度垂直剖面(RCS)出现垂悬回波、有界弱回波区(BWER)、穹窿回波等冰雹的特征回波。垂直风廓线产品(VWP)从低层到中层出现风向、风速的垂直切变特征; 云体垂直累积液态水含量 5 月 VIL $\geq 20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 6~8 月 VIL $\geq 30\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 且 VIL 在测站降雹前具有跃增增长现象; 冰雹指数产品(HI)至少持续 5 个体扫出现实心大三角标识。

基金项目

2018 年度新疆南疆重点产业创新发展支撑项目(KJ2018SF01)和新疆气象局面上项目(MS201903)共同资助。

参考文献

- [1] 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, 2007: 41-62.
- [2] 赵文慧, 姚展予, 贾烁, 王伟健, 张沛, 高亮书. 1961-2015 年中国地区冰雹持续时间的时空分布特征及影响因子研究[J]. 大气科学, 2019, 43(3): 539-551.
- [3] 刘欣, 王咏青, 胡志群, 周玉淑. 青藏高原一次冰雹强对流天气过程的诊断及雷达回波特征分析[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(5): 611-625.
- [4] 王研峰, 黄武斌, 王聚杰, 黄玉霞, 段伯隆, 杨勇. 一次甘肃天水强冰雹的雷达回波特征及成因分析[J]. 高原气象, 2019, 38(2): 368-376.
- [5] 黄艳, 裴江文. 新疆喀什地区冰雹气候特征及大气环境背景分析[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 526-532.
- [6] 陈艳丽. 2015 年塔里木垦区“5. 27”暴雨天气过程的诊断分析[J]. 新疆农垦科技, 2015, 38(9): 57-59.
- [7] 周雪英, 贾健, 刘国强, 王芳, 仇会民, 孙怀琴. 1997-2017 年塔克拉玛干沙漠腹地降水特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(1): 187-194.
- [8] 彭军, 汤达章, 周雪英. 库尔勒市 2015 年两次冰雹天气成因及雷达回波特征对比分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 753-761.
- [9] 王昀, 谢向阳, 马禹, 王式功. 天山北侧成灾雹云移动路径及预警指标的研究[J]. 干旱区地理, 2017, 40(6): 1152-1164.
- [10] 周大胜, 谢向阳, 陈艳丽. 新疆塔里木盆地西部一次强对流性天气的成因分析[J]. 气候变化研究快报, 2019, 8(6): 821-827.
- [11] 王昀, 卢品睿, 王旭. 天山南侧喀什地区冰雹潜势预报及预警指标的研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 937-944.
- [12] 张磊, 张继东, 热苏力阿不拉. 南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] 支竣, 陈春艳, 毛炜峰. 新疆喀什西部新一代天气雷达产品的冰雹预警指标研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 95-105.

- [14] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 新一代天气雷达原理和应用讲义: 修订本[M]. 北京: 中国气象局培训中心, 2004: 1-3, 187-197.
- [15] 白爱娟, 程志刚. 新一代天气雷达图像分析及应用[M]. 北京: 气象出版社, 2019: 105-115.