

安大维,陈春艳,窦刚,等.阿克苏地区西部冰雹天气雷达回波演变特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(6):59-66.  
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.06.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 阿克苏地区西部冰雹天气雷达回波演变特征分析

安大维<sup>1</sup>,陈春艳<sup>1\*</sup>,窦刚<sup>1</sup>,刘军建<sup>2</sup>,孙鸣婧<sup>1</sup>

(1.新疆气象台,新疆 乌鲁木齐 830002;2.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:**利用2009—2020年阿克苏地区西部6县市中国气象局灾情直报、地面观测、阿克苏多普勒雷达资料,分析冰雹天气时空分布及雹云雷达回波演变特征,结果表明:(1)2009—2020年出现冰雹共211站次,2011年最多,出现28站次;高发期为5—8月,6月冰雹频次最高;日变化峰值在16—19时。(2)雹云单体最强反射率因子均 $\geq 52$  dBZ,回波顶高 $>8$  km,垂直累积液态水含量跃、增达 $4.47$  kg/m<sup>2</sup>及以上且垂直累积液态水含量最大值 $>10.0$  kg/m<sup>2</sup>时,雷暴单体发展为雹暴的可能性极大。超级单体雹云反射率因子、回波顶高、垂直累积液态水含量最大值统计指标均高于多单体和普通单体雹云。(3)普通单体雹云多初生于乌什县、温宿县北部沿山一带;多单体雹云多初生于乌什县西部南部、温宿县北部沿山一带,乌什县境内最多;超级单体雹云多初生于温宿县。(4)雹云回波发展初期往往伴随着第一次爆发式增长:反射率因子增大、回波顶升高、垂直累积液态水含量跃增,超级单体雹云表现更为明显,降雹时刻伴随着再一次爆发式增长。垂直累积液态水含量急剧增大或急剧减少与降雹开始和结束关系最为密切。(5)超级单体雹云维持时间和整体生命史均比多单体雹云和普通单体雹云时间长;多单体雹云需要较长的酝酿时间且影响区域较大。

**关键词:**冰雹;雷达回波;演变特征;雹云单体;阿克苏地区西部

**中图分类号:**P458

**文献标识码:**A

**文章编号:**1002-0799(2022)06-0059-08

阿克苏地区是新疆重要的棉花、特色林果业等作物的生产区,是国家优质的棉花种植基地及瓜果之乡,同时阿克苏地区也是新疆雹灾最严重的区域<sup>[1-2]</sup>。冰雹天气的发生具有局地性、突发性和短时性的特点,其监测预警及提前识别极为困难,是当前研究的重难点<sup>[3]</sup>。新一代多普勒天气雷达作为监测强对流天气的重要工具,其回波特征可反映雹云的形态结构及其演变特征,在冰雹识别及预警中发挥了重要

作用<sup>[3-4]</sup>。

目前国际上对冰雹的研究主要集中在时空分布特征、区域模式数值模拟、模型预测等方面<sup>[5-8]</sup>,而我国也有大量研究通过对雷达资料的分析,总结了回波强度、回波顶高、垂直累积液态水含量等冰雹天气监测预警指标<sup>[9-16]</sup>,如冀东地区以最强反射率因子为62 dBZ、回波顶高为9.9 km、垂直累积液态水含量为 $51.6$  kg/m<sup>2</sup>作为预警指标<sup>[11]</sup>,湖北宜昌则以最强反射率因子达40 dBZ、回波顶高达7.6 km作为冰雹云预警参考<sup>[12]</sup>,安徽最强反射率因子基本 $>55$  dBZ、垂直累积液态水含量至少为 $30$  kg/m<sup>2</sup><sup>[15]</sup>。新疆也有相关研究分析<sup>[17-21]</sup>,伊犁河谷的反射率因子达50 dBZ、回波顶高达8 km、且垂直累积液态水含量出现跃增时,应警惕冰雹的发生,当回波顶高 $>11$  km时,出现冰雹的概率较大<sup>[18]</sup>,奎玛流域<sup>[19]</sup>和南疆西

收稿日期:2021-12-28;修回日期:2022-09-15

基金项目:国家自然科学基金“塔里木盆地强冰雹天气成因分析及预警指标研究”(41865004)

作者简介:安大维(1994—),男,工程师,主要从事灾害性天气研究。  
E-mail:daidaixmo@126.com

通信作者:陈春艳(1969—),女,正高级工程师,主要从事天气分析与预报技术研究。E-mail:cheny357@sina.com

部<sup>[20]</sup>的冰雹个例分析表明降雹前均伴随 *VIL* 和 *VILD* 增大的现象,冰雹天气的局地性使得分区进行预报预警指标研究十分必要。对阿克苏冰雹的研究较为丰富,主要集中于灾害区划、个例分析、防雹作业等领域<sup>[21-23]</sup>,朱思华等<sup>[2]</sup>给出了阿克苏地区10次冰雹云降雹时刻雷达观测主要产品的统计值:以 $1.5^\circ$ 仰角反射率因子为50.7 dBZ、回波顶高为9.4 km、垂直累积液态水含量为 $12.8 \text{ kg/m}^2$ 。但针对长时间序列雷达回波及其演变特征的分析相对较少,本文梳理了2009—2020年发生在阿克苏雷达监测范围内的冰雹个例,对冰雹的时空分布及雷达回波产品进行统计分析,并分别对不同类型雹云回波强度、回波顶高、垂直液态含水量 *VIL* 及雹云路径、生命史等特点展开分析,为阿克苏地区冰雹天气监测预警提供参考。

## 1 资料和方法

新疆观测站点较为稀疏,为补充统计样本,弥补常规观测的局限性,本文除统计阿克苏地区西部阿克苏、乌什、温宿、柯坪、阿瓦提、阿拉尔6个国家站冰雹数据外,还收集了灾情直报信息及《中国气象灾害大典》新疆卷中冰雹灾情数据。2009—2020年共收集冰雹实况211站次(1日内国家站观测到冰雹天气或灾情记录该站所代表区域有冰雹记录,就记为该站出现1站次冰雹)。阿克苏多普勒天气雷达在阿克苏地区西部冰雹天气监测预警中发挥了重要作用,本文使用GR2软件(美国Gibson Ridge Software LLC公司GR2Analyst雷达产品处理软件)分析阿克苏地区西部冰雹天气雷达回波演变特征。通过对缺失资料、静锥区影响、无明显雹暴特征的个例进行筛选剔除,最终得到24次有完整生消过程雷达数据的冰雹个例。一次冰雹过程可能受到多个对流单体影响,24次冰雹过程共采集到34个雹云单体,通过追踪34个雹云单体的生消演变过程,归纳总结阿克苏地区西部冰雹天气的雷达回波演变特征。

## 2 时空分布特征

### 2.1 年和月变化

如图1所示,阿克苏地区西部2009—2020年期间共收集到冰雹个例211站次,年均17.6站次。12年来冰雹出现站次呈双峰型分布,2009—2013年是第一个峰值区间,年均出现冰雹21.6站次,其中2011年出现冰雹站次最多,达到28站次,2013年年次之,出现了24站次;2014年最少,仅出现了9站

次;2015年又增至15站次,2019年达到了第二个峰值20站次,2015—2019年年均出现冰雹16.2站次。相比较第一个峰值时段,第二个峰值时段年均冰雹站次减少5站次。从研究区域6个县市冰雹站次变化情况看,海拔较高的乌什县冰雹频次减少最为明显,其次是柯坪县和阿瓦提县,阿克苏市也呈减少趋势,而温宿县冰雹频次呈增加趋势,阿拉尔市增加最为明显。这种变化与气候变化背景相关,同时与下垫面、人影作业等人类活动密切相关,值得深入研究。

阿克苏地区西部降雹主要发生在4—9月,集中出现在5—8月,基本与新疆汛期时间一致,这与华东部分地区有较大差异<sup>[15]</sup>,而西北地区在冰雹月变化方面较为一致。5—8月占比85.8%,6月出现冰雹频次最高,占比28%;其次是5和7月,均占比19.9%。

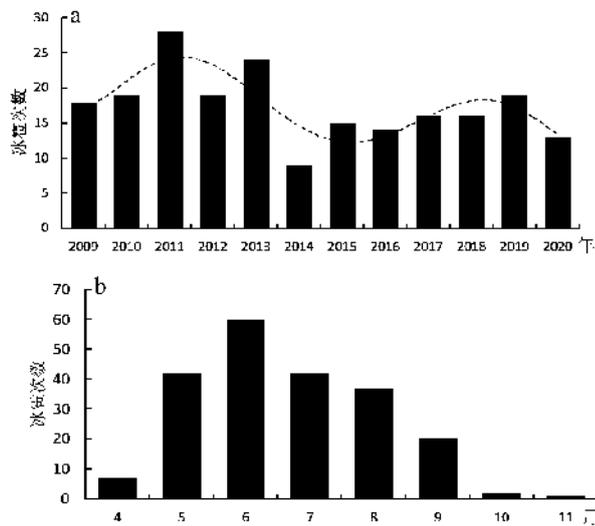


图1 2009—2020年冰雹站次的年(a)、月(b)变化

### 2.2 日变化

阿克苏地区西部冰雹日变化特征显著,主要出现在午后到夜间(14—23时),占比92.9%,其中16—19时为冰雹高发期,占比70.0%(图2);最易出现冰雹的时次是16、18、19时,均占比15.3%,与华北、江淮等地<sup>[10-15]</sup>较为相似。

### 2.3 空间分布

温宿县冰雹出现频次最多,高达48次,年均4次,其次是阿瓦提县的38次,柯坪县和乌什县持平,均为35次,阿克苏市为28次,阿拉尔市最少为27次。211次冰雹个例中有79次来自于气象观测站数据,占比37.4%,其余132次来源于多源冰雹灾情数据,占比高达62.6%,其中87次冰雹灾情记录精确到乡镇。

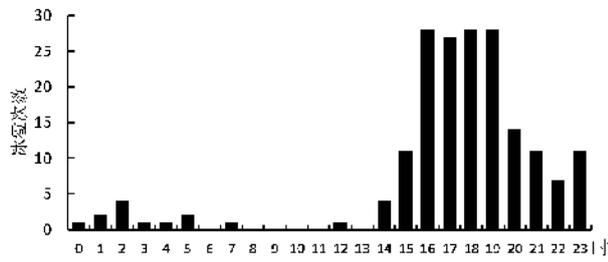


图2 冰雹日变化

### 3 雷达回波演变特征

选取阿克苏地区西部 24 次有完整生消过程雷达数据的冰雹个例(表 1,表中冰雹发生时间和地点均根据雷达回波进行了校正),共采集到 34 个雹云单体,统计 34 个雹云单体降雹时刻的回波强度、回波顶高和垂直液态水含量 *VIL*,分析阿克苏地区西

部冰雹监测预警阈值。

#### 3.1 雹云单体雷达回波统计特征

冰雹云是强对流风暴的产物,根据微波散射理论,当产生的冰雹尺寸越大时,其回波也会越强,因此冰雹云的最强回波常被作为冰雹监测预警指标<sup>[3-4]</sup>。在本次统计的雹云单体中,发展旺盛的冰雹云回波强度最强达到 66.5 dBZ。表 2 统计了 34 个冰雹云的最大反射率因子值,其范围为 52~66.5 dBZ。冰雹云最大回波最常分布在 55~60 dBZ,占比 44%,最大反射率因子均在 52 dBZ 以上,这与很多研究相类似<sup>[2,21,23]</sup>,因此在日常冰雹监测预警业务中,阿克苏雷达回波反射率因子>52 dBZ 时,应警惕出现冰雹。

回波顶高是在 18 dBZ 反射率因子被探测到时显示以最高仰角为基础的回波顶高度,常用来分析

表 1 有完整生消过程雷达数据的冰雹个例集

序号	日期	时间(雷达校正)	地点(雷达校正)	降雹时间/min	最大冰雹直径/cm	雹云单体数/个	雹云回波结构
1	2009-07-13	22:30—23:00	乌什县、温宿县	30	1.2	2	超级、多
2	2009-08-07	17:14—17:18	乌什县	4	2	1	多
3	2010-05-24	17:40—17:56	乌什县	16	0.5	2	普通
4	2010-05-25	18:40—19:20	阿克苏市、温宿县	30	2	1	普通
5	2010-06-01	17:20—19:30	温宿县	30	4	1	超级
6	2011-06-18	18:35—19:46	乌什县	6	3	1	超级
7	2012-07-04	16:17—16:30	温宿县	13	1	1	多
8	2012-07-13	16:00—16:30	柯坪县、阿克苏市、阿瓦提县	20	4	2	超级
9	2012-08-26	17:15—17:45	温宿县	30	2	1	普通
10	2012-09-15	17:30—19:00	温宿县	30	3	1	普通
11	2013-05-14	19:00—21:45	温宿县、阿瓦提县	17	0.7	2	普通、多
12	2013-06-07	16:21—17:28	乌什县、阿克苏市、阿瓦提县	25	2	2	多
13	2013-06-19	18:20—19:35	柯坪县、阿瓦提县	5	0.5	1	多
14	2013-07-07	16:30—17:42	阿克苏市、阿瓦提县	6	0.8	2	普通、多
15	2013-07-08	15:00—17:15	乌什县、阿克苏市、阿瓦提县	15	5	1	多
16	2014-07-08	19:15—19:30	阿瓦提县	15	2	1	超级
17	2014-07-21	19:45—19:50	阿瓦提县	5	0.5	1	多
18	2015-08-11	18:20—18:40	温宿县	20	-	1	多
19	2015-09-04	19:11—20:20	乌什县、温宿县	15	1	2	多、普通
20	2016-05-05	17:00—17:20	乌什县、柯坪县、阿克苏市	20	1	1	普通
21	2016-05-30	15:27—15:33	阿瓦提县	6	-	1	普通
22	2017-06-07	17:00—20:35	温宿县	10	4	1	超级
23	2017-06-23	16:15—19:51	乌什县、柯坪县、温宿县	10	1	2	普通
24	2017-07-22	17:10—19:15	乌什县、阿克苏市、阿瓦提县	10	-	3	普通

表2 反射率因子强度分级统计

	出现次数	百分比
≤50 dBZ	0	0
50~55 dBZ	13	38
55~60 dBZ	15	44
60~65 dBZ	5	14
65~70 dBZ	1	3
≥70 dBZ	0	0

对流云强弱和云体内上升气流伸展高度的指标<sup>[3-4]</sup>。阿克苏冰雹云的最大回波顶高为12.6 km, 最小为7.59 km, 平均回波顶高为10.2 km。冰雹云回波顶高为9~11 km 出现的最多, 占比53%, 94%的冰雹云回波顶高>8 km, 因此实际冰雹监测预警业务中当回波顶高发展到8 km 时, 应当警惕冰雹的出现。

VIL 即垂直累积液态水含量, 是将反射率因子数据转化为等价的液态水值, 对判别带有大冰雹的风暴有重要参考意义, 将冰雹云单体发展过程中VIL 的最大值记为VIL<sub>max</sub>。表3统计了阿克苏地区西部34个雹云单体的VIL<sub>max</sub>, 平均为15.4 kg/m<sup>2</sup>, 10~20 kg/m<sup>2</sup> 出现频次最高, 占57%, 23%的雹云单体VIL<sub>max</sub> ≤ 10 kg/m<sup>2</sup>, 20%的雹云单体VIL<sub>max</sub> ≥ 20 kg/m<sup>2</sup>。

表3 单体最大累积液态水含量VIL<sub>max</sub> 值分段统计

	≤10 kg/m <sup>2</sup>	10~20 kg/m <sup>2</sup>	20~30 kg/m <sup>2</sup>	30~40 kg/m <sup>2</sup>	40~50 kg/m <sup>2</sup>
出现次数	8	19	5	1	1
百分比	23	57	14	3	3

阿克苏地区西部雹云单体雷达回波反射率因子均>52 dBZ、回波顶高均>8 km, 降雹时刻VIL 是雹云单体特征参数中变化幅度较大的一个参量, 77%的雹云单体VIL<sub>max</sub> >10 kg/m<sup>2</sup>, 这些是阿克苏地区西部冰雹天气监测预警的初始阈值。

不同类型的雹云单体其回波强度、回波顶高、垂直液态水含量VIL 及冰雹云移动路径、生命史等演变特征均存在较明显的差异, 追踪34个雹云单体的生消演变过程, 并按照雹云结构特征分类: 普通单体雹云、多单体雹云、超级单体雹云<sup>[4]</sup>, 其中普通单体雹云最多, 共有15个, 其次是多单体雹云12个, 超级单体雹云7个。分别以普通单体、多单体和超级单体分类分析阿克苏地区西部冰雹天气的雷达回波演变特征及其预警阈值。

### 3.2 普通单体冰雹云演变特征

普通单体雹云在乌什县、温宿县出现次数最多, 均达到6次; 其次是阿克苏市为3次, 柯坪县、阿瓦提县均出现2次(表1)。普通单体雹云最大反射率因子在52~63 dBZ, 均值为55.25 dBZ。初始追踪回波单体反射率因子一般在35~39 dBZ, 在2~3个体扫后反射率因子第一次快速增强, 增幅在6.5~16.5 dBZ; 再经历1~3个体扫后反射率因子增强为本次雹云反射率因子的最大值或次大值, 之后反射率因子虽有增减但变幅不大, 直至冰雹降落后反射率因子迅速减弱。

普通单体雹云平均回波顶高为10.09 km, 最高为12.01 km, 最低为7.67 km。和反射率因子一样, 66.7%的追踪单体在2~3个体扫后也出现了回波顶高快速升高的现象, 这与雹云有爆发式增长结论相一致<sup>[3, 25]</sup>; 和反射率因子不同的是回波顶高在爆发式增长之后, 虽有增长但增幅不明显, 冰雹过后回波顶高也是逐渐降低。

普通单体雹云VIL<sub>max</sub> 平均为10.72 kg/m<sup>2</sup>, 最大值为13.6 kg/m<sup>2</sup>, 最小值为6.0 kg/m<sup>2</sup>。多项研究指出VIL 的变化, 尤其是跃增的特性, 可作为判断降雹的指标之一<sup>[24, 25]</sup>。图3a给出普通雹云单体VIL 的变化(单体VIL<sub>max</sub> 出现时记为0, 时间单位为雷达体扫间隔), 普通单体雹云VIL 的变化呈波动状态, 基本出现了1~2次跃增, VIL 跃增与冰雹发生关系密切。普通单体雹云跃增均值为4.57 kg/m<sup>2</sup>, 最大值为7.1 kg/m<sup>2</sup>。

追踪24次冰雹过程中34个冰雹云单体, 连接每个体扫质心绘制了阿克苏地区西部冰雹云生消移动路径图(图4)。普通单体雹云初生位置最多的是乌什县、温宿县北部沿山一带(图4b), 一般沿东南路径影响下游地区; 其次是乌什县南部沿山和浅山区, 乌什县南部沿山一带初生的雹云沿山东移, 南部浅山区乌什县阿合雅乡西南部初生的雹云一般东南移, 依次影响乌什县阿合雅乡、柯坪县启浪乡、最终进入阿克苏市西南部。平原区初生的雹云主要出现在阿克苏市和阿瓦提县。根据雹云单体生命史演变特征, 将雹云单体生命史划分为3个阶段: 雹云酝酿(雹云单体初生至降雹前, 黄色点)、降雹(红色点)、消亡(蓝色点)。普通单体雹云平均需要6.46个体扫形成雹暴, 雹暴平均维持4.15个体扫, 整体生命史为18.31个体扫, 普通单体雹云成熟快、降雹快、降雹后消散时间较长。

### 3.3 多单体冰雹云单体演变特征

阿瓦提县多单体雹云出现最多, 共有5次; 其次

是乌什县4次,阿克苏市、温宿县均为3次,柯坪县1次(表1)。多单体雹云最大反射率因子在52~62 dBZ,均值为56.58 dBZ。12个多单体雹云中9块回波在初始追踪回波之后的2~3个体扫反射率因子增幅为7.5~23.5 dBZ,其余3块回波在初始回波之后反射率因子升高,随后降低。在2~3个体扫后反射率因子快速增大,即多单体雹云在发展初期有一个反射率因子快速增长的过程,反射率因子增幅平均为11.29 dBZ。反射率因子再次增大往往就预示着雹云单体开始生成。

多单体雹云平均回波顶高为9.89 km,最高为

12.44 km,最低为7.97 km。和反射率因子一样,58.3%的追踪单体在2~3个体扫后出现回波顶高快速升高的现象,回波顶高在爆发式增长之后,虽有增长但增幅不明显。

多单体雹云  $VIL_{max}$  均值为  $15.02 \text{ kg/m}^2$ ,最大值为  $32.6 \text{ kg/m}^2$ ,最小值为  $8.0 \text{ kg/m}^2$ 。多单体雹云  $VIL$  的时间变化多呈单峰型,有一个比较突出的主峰,且  $VIL$  跃增幅度较大,在主峰前后还有次峰存在(图3b),这与多单体雹云一般由多个相互联系单体组成和容易出现多次降雪的特征相符<sup>[3-4]</sup>。多单体雹云  $VIL$  跃增均值为  $6.08 \text{ kg/m}^2$ ,最大值为  $13.5 \text{ kg/m}^2$ 。多单

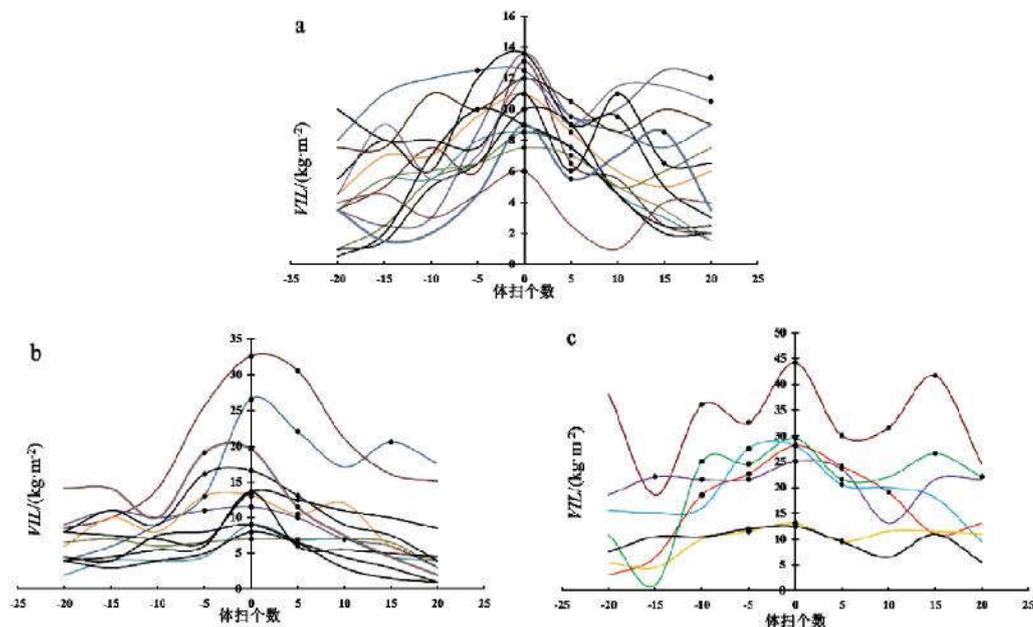


图3 雹云单体  $VIL_{max}$  变化

(·为降雪标记;a为普通单体雹云,b为多单体雹云,c为超级单体雹云)

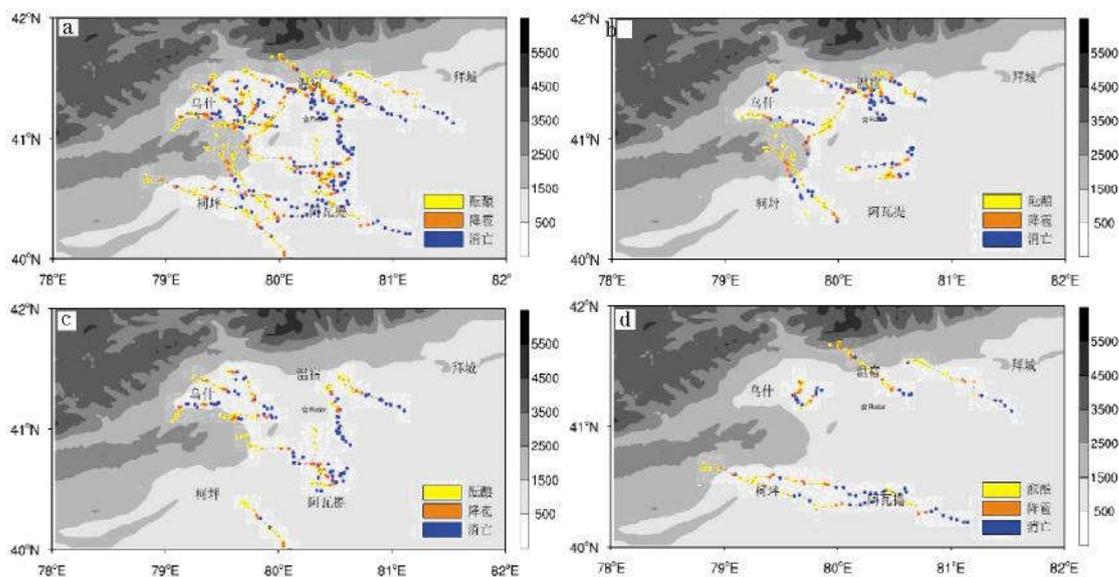


图4 雹云移动路径

(填色代表单体雹云的酝酿、降雪或消亡状态;a为全部雹云单体,b为普通单体雹云,c为多单体雹云,d为超级单体雹云)

体雹云  $VIL$  统计特征值均高于普通单体雹云。

多单体雹云初生于乌什县、温宿县沿山一带,乌什县境内初生最多,除造成乌什县境内降雹外,进而东移或东南移影响阿克苏市、阿瓦提县或柯坪县、阿瓦提县(图 4c);其次是位于平原的阿瓦提县,对流初生后沿西北—东南路径移动,进而发展成为冰雹云。多单体雹云平均需要 7.11 个体扫发展为成熟的雹暴,形成雹暴后平均维持 5.89 个体扫,整体生命史为 18.55 个体扫。

### 3.4 超级单体冰雹云演变特征

超级单体风暴是最强的雷暴,它的水平尺度可达数十公里,在它成熟期可准定常地维持 1 h 以上,且伴随着短时暴雨、大冰雹等较激烈的天气<sup>[3-4]</sup>。阿克苏雷达覆盖区共出现 7 个超级单体雹云(表 1),其中温宿县最多,出现 3 个;其次是柯坪县有 2 个,乌什县、阿瓦提县各出现 1 个。超级单体雹云最大反射率因子在 54~66.5 dBZ,均值为 59.13 dBZ。7 块超级单体雹云均在初始追踪回波 3 个体扫后出现反射率因子跃增,增幅为 5.5~21.7 dBZ。反射率因子再次增大往往预示着雹云单体开始生成,与普通单体和多单体雹云不同,超级单体雹暴形成前反射率因子是一个连续增大的过程,反射率因子达到峰值后虽有变化但变幅较小,直至降雹结束回波强度迅速减弱。

超级单体雹暴平均回波顶高为 11.3 km,最高为 12.7 km,最低为 9.79 km。和反射率因子一样,71.4%的追踪单体在初始回波 2~3 个体扫后也出现回波顶高快速升高的现象,回波顶高在爆发式增长之后,继续有增长但增幅不明显。

超级单体雹暴  $VIL_{max}$  均值为 25.81 kg/m<sup>2</sup>,最大值为 44.2 kg/m<sup>2</sup>,最小值为 12.5 kg/m<sup>2</sup>。超级单体雹云  $VIL$  的变化以多峰型为主(图 3c),基本都出现了 2~3 次跃增,且都是在维持较大值期间出现跃增,超级单体雹云  $VIL_{max}$  跃增均值为 11.94 kg/m<sup>2</sup>,最大值 23.92 kg/m<sup>2</sup>。

超级单体雹云初生于温宿县最多,共出现 3 个,其中,2010 年 6 月 1 日雹云初生于温宿县北部山区塔格拉克牧场,之后东南移造成温宿镇、依希来木其乡、佳木镇大冰雹天气(图 4d);2017 年 6 月 7 日雹云初生于温宿县北部沿山博孜墩乡,东北移扫过柯柯牙管理区、依希来木其乡;2009 年 7 月 13 日雹云初生于温宿县西南部阿热勒镇,沿温宿县与乌什县向浅山带缓慢北推。2012 年 7 月 13 日柯坪县监测到 2 个同时出现的风暴单体,均初生于柯坪县北部

沿山,雹云单体边发展边快速东移,超级单体维持时间在 5~6 个体扫,单体整个生命史超过 150 min,最后东移影响阿克苏市、阿瓦提县。超级单体雹云平均需要 4.43 个体扫发展为成熟的雹暴,形成超级单体雹暴后平均维持 14.14 个体扫,整体生命史为 24.86 个体扫。超级单体雹暴维持时间长于多单体雹暴,多单体雹暴长于普通单体雹暴。

## 4 结论与讨论

应用 2009—2020 年阿克苏雷达覆盖区的阿克苏地区西部 6 县市冰雹天气记录和冰雹灾情数据、24 次冰雹天气过程 34 个雹云单体的雷达资料,分析了冰雹天气的时空分布特征,追踪 34 个雹云单体生消演变过程中的雷达回波演变特征,得出以下结论:

(1)2009—2013 年是阿克苏地区西部冰雹频次的第一个峰值区间,年均出现冰雹 21.6 站次,其中 2011 年出现冰雹站次最多,达到 28 站次。冰雹高发期为 5—7 月,6 月出现冰雹频次最高,一日中最易出现冰雹的时次是 16、18、19 时,均占比 15.3%。

(2)冰雹云最大反射率因子范围为 52~66.5 dBZ,最大反射率因子均 >52 dBZ;94% 的冰雹云回波顶高 >8 km,  $VIL_{max}$  跨度较大,77% 的雹暴单体的  $VIL_{max}$  >10.0 kg/m<sup>2</sup>。超级单体雹暴最大反射率因子均值为 59.13 dBZ,  $VIL_{max}$  均值及其  $VIL$  降雹时刻的跃增均值分别为 25.81、11.94 kg/m<sup>2</sup>,均高于多单体雹暴,多单体雹暴高于普通单体雹暴。超级单体雹暴回波顶高均值为 11.3 km,高于多单体雹暴和普通单体雹暴。

(3)34 个雹云单体中普通单体雹云最多,共有 15 个,其次是多单体雹云 12 个,超级单体雹云 7 个。普通单体雹云在乌什县、温宿县出现次数最多,均达到 6 次。阿瓦提县多单体雹云出现最多,为 5 次;其次是乌什县,为 4 次。超级单体雹云温宿县最多,出现 3 个,其次是柯坪县有 2 个,乌什县、阿瓦提县各出现 1 个。普通单体雹云多初生于乌什县、温宿县北部沿山一带;多单体雹云多初生于乌什县西部南部、温宿县北部沿山一带,乌什县境内初生最多;超级单体雹云多初生于温宿县。

(4)雹云回波发展初期往往伴随着第一次爆发式增长:反射率因子增大、回波顶高升高、 $VIL$  跃增,超级单体雹云表现更为明显,降雹时刻伴随着再一次爆发式增长,雹云单体越强时;第二次爆发式增长幅度会超过雹云初期。超级单体雹暴维持时间(14.14

个体扫)长于多单体雹暴(5.89 个体扫),多单体雹暴长于普通单体雹暴(4.15 个体扫)。VIL 急剧增大或急剧减少与降雹开始和结束关系最为密切。

本文应用收集到的有灾情或冰雹天气记录、且阿克苏雷达资料较为完整的个例展开相关分析,追踪 34 个雹云单体雷达回波演变特征,初步给出了阿克苏雷达覆盖区不同类型雹云单体反射率因子、回波顶高、垂直液态水含量及移动路径、生命史演变特征,但受限于目前雷达分布及高时空分辨率资料,针对不同类型雹云单体的生消演变特征的认识还需深入,不同地域冰雹天气成因和机理还需开展大量的相关研究。阿克苏地区冰雹因其强度及致灾性受到地方政府的高度重视,阿克苏地区不同种类雹云单体的精细特征及预报预警指标研究任重道远。

#### 参考文献:

- [1] 史莲梅,赵智鹏,王旭.1961–2014 年年新疆冰雹灾害时空分布特征[J].冰川冻土,2015,37(4):898–904.
- [2] 朱思华,罗继,曲良璐.新疆阿克苏地区冰雹时空分布及雷达回波特征[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(2):81–88.
- [3] 俞小鼎,王秀明,李万莉,等.雷暴与强对流临近预报[M].北京:气象出版社,2020.
- [4] 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,2013.
- [5] XIE B,ZHANG Q,WANG Y. Trends in hail in China during 1960–2005 [J].Geophysical Research Letters, 2008,35(13).
- [6] NI X,LIU C,ZHANG Q,et al. Properties of hail storms over China and the United States from the Tropical Rainfall Measuring Mission [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2016,121(20): 12,031–12,044.
- [7] LUO L,XUE M,ZHU K,et al. Explicit Prediction of Hail in a Long-Lasting Multicellular Convective System in Eastern China Using Multimoment Microphysics Schemes [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,2018,75(9): 3115–3137.
- [8] KUNZ M,KUGEL P I S. Detection of hail signatures from single-polarization C-band radar reflectivity [J]. Atmospheric Research,2015,153:565–577.
- [9] 张晓茹,贾宏元,谭志强,等.宁夏南部山区两次冰雹过程对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(3):29–37.
- [10] 张晓辉,高艳春,易永力,等.承德市冰雹时空分布特征及雷达预警指标分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(2): 16–22.
- [11] 王莎,沙勇,宋金妹,等.冀东地区冰雹云多普勒雷达参数特征分析[J].气象,2019,45(5):713–722.
- [12] 汤兴芝,黄兴友.冰雹云的多普勒天气雷达识别参量及其预警作用[J].暴雨灾害,2009,28(3):71–75.
- [13] 张芳,虎琚.青海省晏文农业区冰雹天气特征分析及预警指标研究[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(1):63–71.
- [14] 陆飞,阮蔚琳,邓雯.2021 年盛夏苏中南一次强冰雹过程大气环境与雷达回波特征[J].暴雨灾害,2022,41(2): 167–173.
- [15] 鲁德金,陈钟荣,袁野,等.安徽地区春夏季冰雹云雷达回波特征分析[J].气象,2015,41(9):1104–1110.
- [16] 雷瑜,黄武斌,黎倩,等.不同天气分型下甘肃河东地区强冰雹天气多普勒雷达产品特征[J].干旱气象,2022,40(2):234–243.
- [17] 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.
- [18] 孙鸣婧,刘俊哲,陈春艳,等.伊犁河谷冰雹及其雷达回波特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(5):1–8.
- [19] 栾亚睿,陈春艳,汪雪云,等.奎玛流域两次冰雹天气成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(2):78–84.
- [20] 郑育琳,刘艳,栾亚睿,等.南疆西部 2 次冰雹过程对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(6):1–9.
- [21] 热苏力·阿不拉,牛生杰,张磊,等.基于多普勒天气雷达的冰雹云早期识别与预警方法研究 [J]. 冰川冻土, 2017,39(3):641–650.
- [22] 李斌,郑博华,朱思华.新疆重点雹区防雹作业效果检验评估[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(2):116–122.
- [23] 彭江良,吴芳,黄海云,等.阿克苏地区一次冰雹天气过程分析[J].沙漠与绿洲气象,2009,3(5):15–19.
- [24] 刘治国,俞小鼎,陶健红,等.青藏高原北侧雹云单体最大垂直累计液态含水量的演变特征及其在降雹定时判断中的应用[J].气象学报,2008,66(4):609–620.
- [25] 周小刚,费海燕,王秀明,等.多普勒雷达探测冰雹的算法发展与业务应用讨论[J].气象,2015,41(11):1390–1397.
- [26] 孙继松,石增云,王令.地形对夏季冰雹事件时空分布的影响研究[J].气候与环境研究,2006,11(1):76–84.

## Characteristics of the Radar Echo Evolution of Hail Storm in the Western Aksu

AN Dawei<sup>1</sup>, CHEN Chunyan<sup>1</sup>, DOU Gang<sup>1</sup>, LIU Junjian<sup>2</sup>, SUN Mingjing<sup>1</sup>

(1. Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China;

2. Institute of Desert and Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

**Abstract** The spatial and temporal distribution of hail storm and the radar echo evolution characteristics of hail-producing clouds in 6 counties and cities in the western Aksu region from 2009 to 2020 were analyzed, based on the direct disaster report provided by the China Meteorological Administration, ground-based observation data and Aksu Doppler radar data. The results show that: (1) The hail occurred in 211 stations from 2009 to 2020, with the highest frequency (28 stations) occurred in 2011. The high incidence period was from May to August, and the highest frequency occurred in June. The peak value of the frequency in its daily variation occurred in 16:00–19:00. (2) The storm cell was highly likely to develop into a hailstorm when the maximum reflectivity factor of hail-producing cloud cells were  $\geq 52$  dBZ and the echo top height was higher than 8 km, as well as the vertical integrated liquid (VIL) water content was up to  $\geq 4.47$  kg·m<sup>-2</sup>, and the maximum VIL water content ( $VIL_{\max}$ ) reached to 10.0 kg·m<sup>-2</sup>. The statistical index of the reflectivity factor, echo top height and  $VIL_{\max}$  of the supercell hailstorms were higher than those of multi-cells and ordinary single-cell storms. (3) Ordinary single-cell storms were mainly found in the mountainous area in the north of Wushi County and Wensu County. Multi-cell hailstorms were mainly found in the southwest of Wushi County and along the mountainous region in the north of Wensu County, with the largest number occurred in Wushi County. Super single hailstorms mostly occurred in Wensu County, and the movement directions of storms were mainly from northwest to southeast. (4) The initial stage of hail-producing cloud echo development was often accompanied by the first explosive growth of the reflectivity factor, rising the echo top, and jumps of the VIL. The performance of super-cell hail storms was more obvious, and the hail falling time was accompanied by another explosive growth. The sharp increase or decrease of VIL was most closely related to the beginning and end of hail falling. (5) The maintenance time and overall life history of super single hailstorms were more than that of single hailstorms and ordinary single hailstorms, and the multi-cell storms required a long incubation time and had a large impact area.

**Key words** hail; radar echo; evolutionary characteristics; hailstorm cell; western Aksu region