

刘昭武,田世芹.黄河三角洲地区冰雹过程雷达特征分析[J].气象研究与应用,2022,43(4):72–78.

Liu Zhao Wu, Tian Shi Qin. Radar characteristic analysis of hail process in the Yellow River Delta area[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2022, 43(4): 72–78.

黄河三角洲地区冰雹过程雷达特征分析

刘昭武^{1,2}, 田世芹^{1,2}

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室, 济南 250031; 2.滨州市气象局, 山东 滨州 256612)

摘要: 利用新一代天气雷达产品资料, 统计分析了 2016—2020 年 192 个黄河三角洲地面降雹个例, 从基本反射率因子(R)、垂直积分液态含水量(VIL)、垂直积分液态含水量密度(VILD)特征值等方面归纳出预警临近指标, 并应用这些指标分析了 2019 年 5 月 12 日一次局地强对流天气过程。结果表明, 风暴单体 A3、X3 初始回波主要生成于 0℃层和-20℃层之间, 跃增阶段 R、单位体回波厚度平均每个体扫间隔分别增加 5.8 dBZ、1.5 km 以上, 孕育阶段 VIL、强回波最高高度(H₄₅)平均每个体扫间隔分别增加 5.6 kg·m⁻²、0.7 km 以上, 且至少出现一次 VIL 跃增 10 kg·m⁻² 以上, 降雹阶段回波顶高、H₄₅、VIL 值迅速减少, 具有明显的冰雹云生命史特征; 两个风暴单体在孕育、降雹阶段表现出不同的发展演变特点, 对冰雹的形成和维持有明显的影

关键词: 黄河三角洲; 地面降雹; 预警临近指标; 生命史特征

中图分类号: P482

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.4.12

引言

冰雹是黄河三角洲地区主要自然灾害之一, 仅 2016—2020 年就累计收集到 192 个降雹个例。冰雹天气具有突发性强、灾害性严重、预报难度大的特点, 开展冰雹云的雷达产品特征分析, 可以有效地判识冰雹, 及时发布预警信息, 采取人工防雹作业等措施, 对减轻冰雹灾害造成的损失具有重要意义。

利用新一代天气雷达开展冰雹云的观测识别, 国内外气象工作者对此进行了一系列的研究。谢启玉、黄丹萍等^[1-2]指出降雹单体在成熟前期有明显的垂直积分液态含水量(VIL)跃增现象, 降雹时间基本上在 VIL 达到最大后开始, VIL 指标具有较好的预警提前性; 刁秀广等^[3]用基于风暴单体的 VIL 和单体强中心高度同步增加现象可以判断冰雹的产生; 张磊等^[4]指出雷达产品 VIL、垂直风廓线产品(VWP)能很好地指示冰雹云发展情况, 是判别降雹趋势的指标; 魏勇等^[5-7]指出弱回波区、超过 8km 的 50dBZ 强回波墙、“逆风区”、VIL 大值区, 都对冰雹

天气预警具有较好的指示意义; 李俊河等^[8-10]指出多普勒天气雷达探测强对流天气, 速度图上有明显中气旋特征, 基本反射率因子(R)图上存在钩状回波、V 型缺口、回波悬垂以及三体散射等特征。以上研究成果在提高冰雹的识别能力上有很好的指导作用, 但是冰雹具有明显的地域特征, 无法直接引用上述研究成果。本文利用 2016—2020 年期间黄河三角洲地区出现的地面降雹资料, 统计分析冰雹的雷达参数指标, 研究对流风暴单体发展演变特征, 为黄河三角洲地区业务人员判识冰雹提供借鉴。

1 资料与方法

利用 2016—2020 年黄河三角洲地面降雹观测资料: 一是滨州 SA 型多普勒天气雷达观测产品; 二是滨州市、东营市所属 113 个炮点所在乡镇及 12 个国家气象观测站观测的冰雹资料; 三是各级民政部门统计的冰雹灾情资料。

2016—2020 年期间, 地面降雹按年月统计分析(见图 1), 可见冰雹分布无论是年际变化, 还是月际

收稿日期: 2022-07-15

基金项目: 山东省气象局面上课题(2020sdqxm21)、山东省气象创新团队任务(人工影响天气关键技术创新团队)资助

作者简介: 刘昭武(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事人工影响天气方面研究。E-mail: lzwbeifeng@126.com

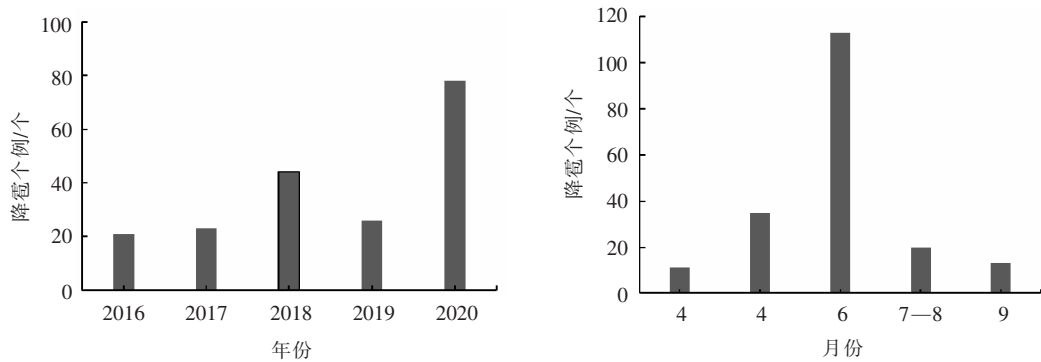


图 1 按年、月统计黄河三角洲地面降雹个例

变化,差别都比较大,每年降雹最多的是 6 月,此时正值黄河三角洲地区夏收、夏种、夏管的关键时节,降雹对农业生产的影响较大,是黄河三角洲地区冰雹的重点防范期。

2 结果与分析

2.1 雷达产品参数统计

R、VIL 是冰雹识别的主要参数,对 192 个降雹个例雷达产品数据进行统计分析(见表 1),R 最大值 69dBZ,出现在 5 月;VIL 最大值 82kg·m⁻²,出现在 8 月;垂直积分液态含水量密度(VILD)最大值 7.6g·m⁻³,出现在 6 月。按照满足 90%的个例统计 R、VIL、VILD 特定值,4 月 R 值为 55dBZ,5 月、9 月 57dBZ,6—8 月 59dBZ;4 月 VIL 值为 25kg·m⁻²,5 月、9 月 30kg·m⁻²,6 月 35kg·m⁻²,7—8 月 40kg·m⁻²;4—5

月 VILD 值为 3.4g·m⁻³,6—8 月 4.0g·m⁻³,9 月 4.6g·m⁻³。R、VIL(或 VILD)特定值满足以上指标作为黄河三角洲降雹的预警临近指标。

192 个降雹个例出现在 107 个风暴单体上,平均每个风暴单体出现 1.8 个降雹。章国材^[11]指出 1 个体扫 VIL 激增 10kg·m⁻²、达到 40kg·m⁻² 可以作为冰雹预警的临界指标。107 个风暴单体中,VIL 值出现 10kg·m⁻² 及以上跃增单体有 101 个,占 94.4%,没有出现 10kg·m⁻² 及以上跃增的风暴单体仅有 6 个,占 5.6%,与文献[4,12,13]结论相一致。一般风暴单体在整个生命期会出现 1~2 次跃增,最多的出现了 4 次跃增,VIL 跃增值主要分布在 10~20kg·m⁻²,最大值达到了 42.9kg·m⁻²。因此出现 1 次以上 VIL 值 10kg·m⁻² 及以上跃增可作为黄河三角洲降雹预警的临近指标。

表 1 2016—2020 年期间降雹单体雷达产品参数统计

时间	R/dBZ				VIL/kg·m ⁻²				VILD/g·m ⁻³			
	平均	最大	特定值	占比/%	平均	最大	特定值	占比/%	平均	最大	特定值	占比/%
4 月	58.9	63.5	55	90.0	33.5	43.6	25	90.0	4.3	5.9	3.4	90
5 月	60.4	69	57	91.2	40.4	61	30	91.2	4.8	7.0	3.5	93.9
6 月	62.1	68	59	92	49.4	80	35	92	5.4	7.6	4.0	92.9
7—8 月	61.2	66	59	94.7	52.3	82	40	89.5	5.1	7.1	4.0	90
9 月	62.5	67	58	100	41.9	64.4	30	92.3	5.3	7.0	4.6	92.3

为进一步分析风暴单体的演变过程,综合降雹指标判断,能够观测到首次降雹的风暴单体 61 个,其中 10 个风暴单体识别并编号时 VIL≥20kg·m⁻²,认定为分离单体,即该单体自发展成熟的风暴单体中分离出来并重新编号,51 个风暴单体识别并编号

时 VIL<20·m⁻²。因此,剔除 10 个分离风暴单体,对剩余的 51 个风暴单体作重点分析。

2.2 风暴单体主要发展阶段

王昂生等^[13]指出冰雹云的生命演变史可划分为发生、跃增、酝酿、降雹和消亡五个阶段,其中跃增和

酝酿阶段是云体突发增加和最强烈的时期,前者为后者创造了条件,致使酝酿期具备很强的上升气流、丰富的水汽和适宜的低温,构成了冰雹云生命史中最有利成雹的阶段。许焕斌^[14]指出跃增阶段跃增幅度大,把水凝物送达低温区,和孕育(酝酿)阶段时间长都非常有利于形成冰雹,降雹阶段是降雹开始到降雹终结。因此研究跃增、孕育、降雹三个阶段的发展演变特征,对于冰雹识别、预警、防范等有重要意义。

2.2.1 跃增阶段

云体垂直突发猛进的阶段,该阶段云体的 R 最大值在 20dBZ 以上,云体的回波强度、回波高度迅速增加,一般在几到十几分钟内顶高增加 5~7km,强度增至 30dBZ 以上的回波中心伸展到 4~6km,云顶到达-40℃层。根据 SCIT 单体识别指标($R \geq 30\text{dBZ}$),51 个风暴单体首次被识别时, $R \geq 30\text{dBZ}$ 回波高度均高于 0℃层高度,因此为便于业务应用,可将 SCIT 单体首次识别即认定为已经进入跃增阶段,跃增阶段单体顶高迅速增加, $R \geq 30\text{dBZ}$ 回波高度可抵达-20℃层以上。

2.2.2 孕育阶段

章国材^[11]指出,根据 Smith 等(1975)^[15]提出的云内最初冰雹增加为中数体积水汽凝结体的直径是 0.4~0.5cm 的理论,使用通用的雷达气象方程和马歇尔-帕尔马(1948)雨滴谱指数分布关系式推导出:冰雹云初期等效雷达 R 为 44dBZ。因此 45dBZ 强回波伸到云体的中上部(即-20℃高度层以上)时,才可能成雹,可作为孕育阶段的开始时间。进入孕育阶段以后,虽然回波顶高、强度不再迅速增加,但强回波区在扩大,是冰雹生长时期,直至风暴单体雷达参数指标满足黄河三角洲降雹预警的临近指标。

2.2.3 降雹阶段

降雹开始到降雹终结阶段,随着地面降雹,回波顶高、强度快速下降。直至风暴单体雷达产品参数指标满足降雹结束指标:R 满足(4 月<53dBZ,5 月、9 月、6 月<55dBZ,7—8 月<58dBZ)且 VIL 满足(4 月<20kg·m⁻²,5 月、9 月<25kg·m⁻²,6 月、7—8 月<30kg·m⁻²),H₄₅ 逐渐降至-20℃层以下,冰雹不再具备适宜的生长环境。

2.3 “5·12”降雹个例分析

选取 2019 年 5 月 12 日黄河三角洲出现的一次局部强对流天气过程,分析跃增、孕育、降雹阶段的风暴单体演变特征。

2.3.1 单体降雹概况

2019 年 5 月 12 日 16—19 时,黄河三角洲出现了一次局地强对流天气过程,其中滨州市有 4 个人影作业点附近观测到了冰雹,直径大都在 3~5mm,个别颗粒直径接近 10mm;出现降雹的为对流单体 A3、X3,其中对流单体 A3 自滨州市阳信县城北部生成,向 ENE 方向移动,沿途经过或从附近经过滨州市 8 个人影作业点,其中有 3 个人影作业点观测到了冰雹;对流单体 X3 生成于德州市商河县,向 NE 方向移动,经滨州市惠民县北上,沿途经过或从附近经过滨州市 15 个人影作业点,其中有 1 个人影作业点观测到了冰雹。

2.3.2 单体 A3 发展演变过程

风暴单体 A3 发展演变过程雷达产品参数统计见表 2。根据编号的风暴单体 A3 向后反查,5 月 12 日 15:54(图略),SA 雷达首次观测到风暴单体 A3 初始回波,生成于 5.7~6.1km 高度左右,介于 0℃层和-20℃层之间,R 最大值 23.0dBZ,此时风暴单体 A3 进入跃增阶段。16:06(图 2a),风暴单体 A3 正式

表 2 2019 年 5 月 12 日降雹单体 A3 雷达产品参数统计

时间	R (dBZ)	回波顶高 (km)	H ₄₅ (km)	垂直剖面 H ₄₅ (km)	VIL (kg·m ⁻²)
15:54	23.0	6.1	/	/	/
16:06	39.5	9.2	/	/	3.4
16:12	46.0	10.0	/	/	8.7
16:18	52.0	10.3	6.5	6.1	16.2
16:24	58.5	10.6	7.3	7.0	33.6
16:30	60.5	11.0	7.9	7.4	37.6
16:42	62.5	11.0	8.6	8.1	45.0
17:00	59.0	7.6	5.7	5.3	23.4

备注:5 月 12 日章丘站探空资料计算 08 时 0℃层高度 3.4km,-20℃层高度 6.3km;“/”表示无数据。

编号,回波顶高 9.2km 以上, H_{30} (依据 PPI 体扫相邻仰角回波强度和所在高度进行平均差值计算的 30dBZ 回波最高高度,下同)达到 7.3km 以上,与垂直剖面产品 H_{30} 相差 0.4km,超过了 -20°C 层高度,R 最大值 39.5dBZ,回波面积也出现明显增大。16:12 风暴单体 A3 回波顶高增加 0.8km,R 最大值 46.0dBZ。16:18(图 2b)风暴单体 A3 回波顶高略增加,R 最大值 52.0dBZ, H_{45} (依据 PPI 体扫相邻仰角回波强度和所在高度进行平均差值计算的 45dBZ 回波最高高度,下同)达到 6.5km 左右,与垂直剖面产品 H_{45} 相差 0.4km,超过 -20°C 层高度,回波面积明显增大,风暴单体 A3 进入孕育阶段。16:24 风暴单体 A3 回波顶高略增加,R 最大值 58.5dBZ, H_{45} 达到 7.3km 左右,VIL 值 $33.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,较上一体扫跃增了 $17.4\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,此时风暴单体 A3 雷达产品 R、VIL、VIL 跃增量均已满足 5 月份降雹预警的临近指标,风暴单体 A3 随时有可能出现降雹^[16-17]。16:30(图 2c)阳信劳店人影作业点观测到降雹,风暴单体 A3 进入降雹阶段,回波顶高已伸展至 11.0km 以上,R 最大值 60.5dBZ, H_{45} 达到 7.9km 左右,与垂直剖面产品 H_{45} 相差

0.5km,VIL 达到 $37.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。随后 16:42 沾化古城、17:00 沾化永丰相继出现降雹,持续时间约 30min,回波顶高、 H_{45} 、R、VIL 值分别为 11.0km、8.6km、62.5dBZ、 $45.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。17:00(图 2d), H_{45} 降至 5.7km,与垂直剖面产品 H_{45} 相差 0.4km,低于 -20°C 层高度,同时 VIL 值 $23.4\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,低于 5 月份冰雹结束指标,但是 R 最大值 59.0dBZ,仍然维持较大值。17:06 之后,风暴单体 A3 继续减弱。

风暴单体 A3 跃增阶段为 15:54—16:18,4 个体扫间隔垂直方向单体回波厚度增加了 8.9km,平均每个体扫间隔增加 2.2km,R 最大值增加 23.0dBZ,平均每个体扫间隔增加 5.8dBZ。孕育阶段为 16:18—16:30,2 个体扫间隔垂直方向单体回波厚度仅增加 0.8km 左右,R 最大值增加 7.5dBZ,但 VIL、 H_{45} 分别增加 $21.4\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、1.4km,平均每个体扫分别增加 $10.7\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、0.7km,出现了一次 VIL 跃增达 $17.4\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。降雹阶段为 16:30—17:00,5 个体扫间隔回波顶高下降 3.5km,R、 H_{45} 、VIL 值先缓慢增大后迅速减少。风暴单体 A3 发展演变过程中, H_{30} 、 H_{45} 与垂直剖面产品 H_{30} 、 H_{45} 相差不超过 0.5km。

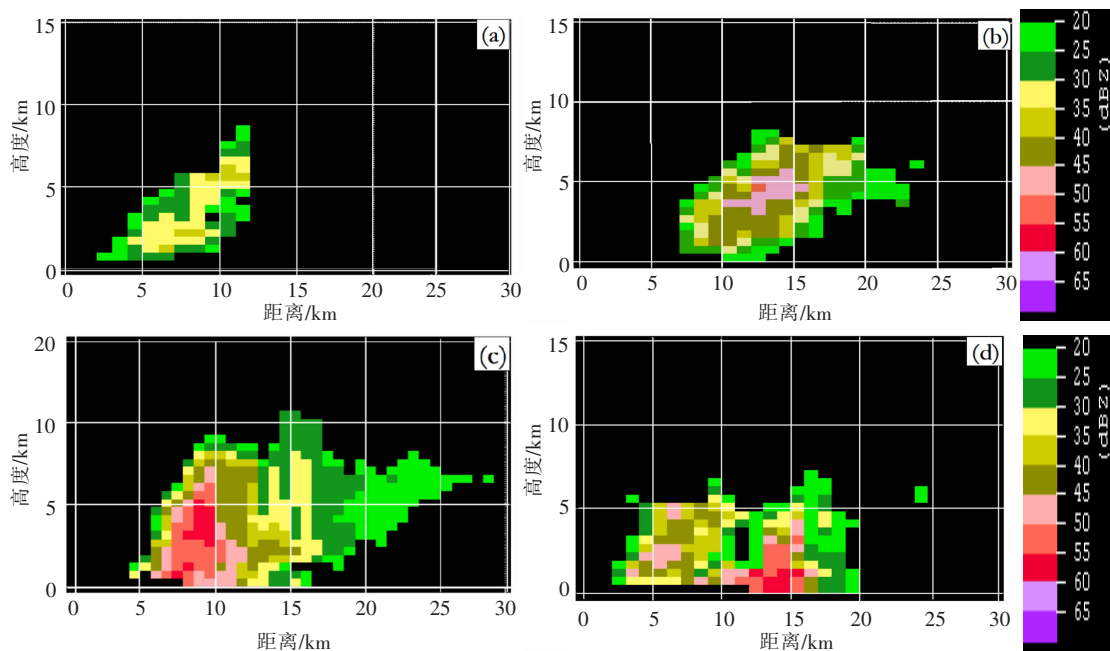


图 2 16:06(a)、16:18(b)、16:30(c)、17:00(d)风暴单体 A3 组合反射率和垂直剖面产品

2.3.3 单体 X3 发展演变过程

风暴单体 X3 发展演变过程雷达产品参数统计见表 3。根据编号的风暴单体 X3 向后反查,5 月 12 日 16:18 (图略),SA 雷达首次观测到风暴单体 X3

初始回波,生成于 5.4~6.1km 高度左右,介于 0°C 层和 -20°C 层之间,R 最大值 24.0dBZ,此时风暴单体 X3 进入跃增阶段。16:24(图 3a),风暴单体 X3 正式编号,回波顶高在 7.2km 以上, H_{30} 达到 7.1km 以上,

表 3 2019 年 5 月 12 日降雹单体 X3 雷达产品参数统计

时间	R (dBZ)	回波顶高 (km)	H ₄₅ (km)	垂直剖面 H ₄₅ (km)	VIL (kg·m ⁻²)
16:18	24.0	6.1	/	/	/
16:24	37.0	7.2	/	/	1.3
16:36	49.5	8.1	5.9	/	10.0
16:42	54.0	8.1	6.3	6.1	20.2
17:24	56.0	9.0	7.4	/	31.4
17:30	61.0	9.6	7.7	7.3	36.7
17:48	62.5	11.1	11.0	/	49.5
17:54	62.0	11.3	8.1	7.6	40.8

备注:5 月 12 日章丘站探空资料计算 08 时 0℃层高度 3.4km,-20℃层高度 6.3km;“/”表示无数据。

与垂直剖面产品 H₃₀ 相差 0.2km,超过了-20℃层高度, R 最大值 37.0dBZ,回波面积明显增大。随后 16:30、16:36 两个体扫,风暴单体 X3 回波顶高增至 8.1km 以上,R 最大值 49.5dBZ。16:42(图 3b)风暴单体 X3 回波顶高增至 8.1km 以上,R 最大值 54.0dBZ,H₄₅ 达到 6.3km 以上,与垂直剖面产品 H₄₅ 相差 0.2km,达到-20℃层高度,风暴单体 X3 进入孕育阶段,同时 VIL 值 20.2kg·m⁻²,较上一体扫跃增了 10.2kg·m⁻²。随后的 6 个体扫,风暴单体 X3 无明显发展,R、VIL 值均不能同时满足 5 月降雹预警的临近指标。17:24 风暴单体 X3 的 VIL 达 31.4kg·m⁻²,第二次跃增了 10.1kg·m⁻²,但是回波中高层分裂成两个单体,此时风暴单体 X3 的 R 最大值 56.0dBZ。17:30 风暴单体 X3 顶高增至 9.6km 以上,R 最大值 61.0dBZ,VIL 达

36.7kg·m⁻²,H₄₅ 达到 7.7km 以上,此时 R、VIL、NIL 跃增量均满足 5 月降雹预警的临近指标,随时可能出现降雹。随后 17:36、17:42、17:48 三个体扫,风暴单体 X3 回波顶高迅速增至 11.1km 以上,R 最大值维持在 62.5dBZ 左右,VIL 增至 49.5kg·m⁻²,H₄₅ 增至 11.0km 以上。17:57(图 3c)沾化黄升出现降雹,时间只有几分钟,此时风暴单体 X3 的 H₄₅ 突降至 8.1km 左右,与垂直剖面产品 H₄₅ 相差 0.5km,R 值变化不大,VIL 值降至 40.8kg·m⁻²后缓慢下降。随后风暴单体 X3 持续减弱,18:11 体扫(图 3d),H₄₅ 降至 5.9km 后缓慢下降,已经低于-20℃层高度,R 降至 57.0dBZ 后缓慢下降,VIL 降至 25.0kg·m⁻²后缓慢下降,低于 5 月冰雹结束指标,直至风暴单体 A3 不再编号。

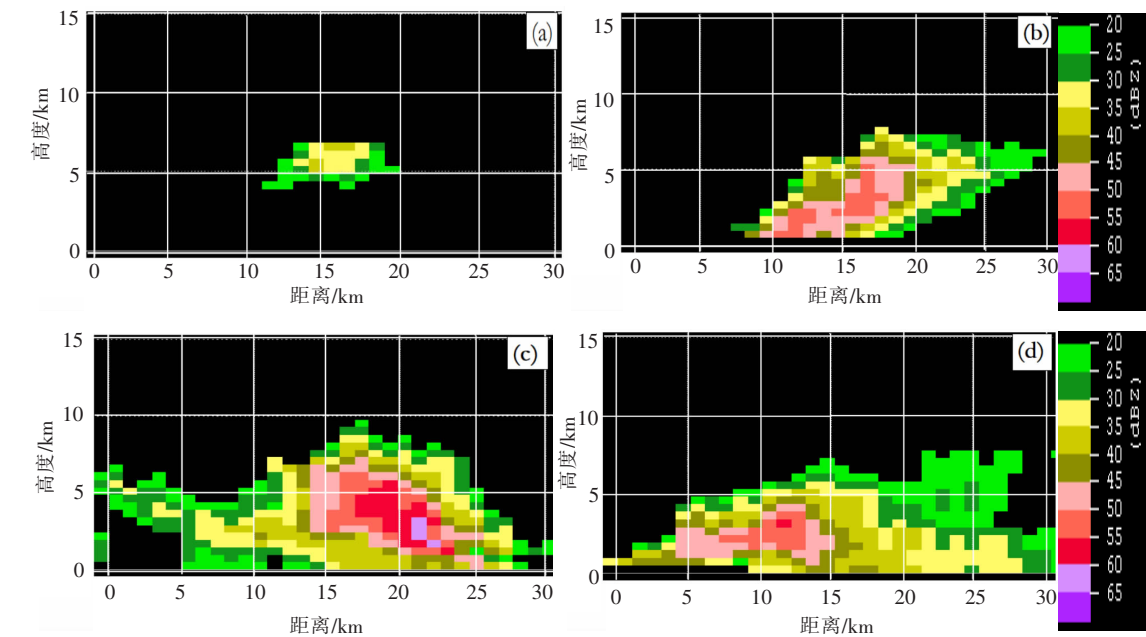


图 3 16:24(a)、16:42(b)、17:54(c)、18:11(d)风暴单体 A3 组合反射率和垂直剖面产品

风暴单体 X3 跃增阶段为 16:18—16:42, 4 个体扫间隔垂直方向单体回波厚度增加 6.1km, 平均每个个体扫间隔增加 1.5km, R 最大值增加 25.5dBZ, 平均每个个体扫间隔增加 6.4dBZ。孕育阶段为 16:42—17:57, 维持时间长达 1.5h, 尤其在 17:18 之前, 风暴单体 X3 发展演变平缓, 不利于高层较大冰雹的形成, 冰雹未落地已融化; 17:24 之后, VIL、 H_{45} 平均每个个体扫分别增加 $5.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、0.8km, 出现一次 $10.1\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 跃增, 风暴单体 X3 的剧烈发展, 有利于高层较大冰雹的形成。降雹阶段为 17:57—18:00, H_{45} 、VIL 值分别降低了 3.2km、 $13.7\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 回波顶高、R 变化不大。风暴单体 X3 发展演变过程中, H_{30} 、 H_{45} 与垂直剖面产品 H_{30} 、 H_{45} 相差不超过 0.5km。鉴于垂直剖面产品因不同的人, 不同方位做剖面, 其单体形状、结构、强回波伸展高度等均完全不同, 存在较大的随机性。因此, 使用 PPI 体扫相邻仰角和所在高度进行平均差值计算的 30dBZ 或 45dBZ 回波最高高度, 可以替代垂直剖面产品数据使用。

3 结论与讨论

(1) 根据 2016—2020 年黄河三角洲冰雹过程资料分析, 可见冰雹分布无论是年际变化, 还是月际变化, 差别都比较大, 一般每年降雹主要出现在 4—9 月, 其中降雹最多的是 6 月, 是冰雹的重点防范期。统计分析的 4—9 月 R、VIL(或 VILD)特征值, 以及出现 1 次以上 VIL 值 $10\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 及以上跃增, 可作为黄河三角洲降雹预警的临近指标。

(2) “5·12”局部强对流天气过程, 两个风暴单体均具有明显的冰雹云生命史特征: 一是初始回波主要生成于 0°C 层和 -20°C 层之间; 二是跃增阶段回波强度、单体回波厚度迅速增加, 平均每个个体扫间隔分别增加 1.5km、5.8dBZ 以上; 三是孕育阶段回波强度、单体回波厚度增加趋缓, 但是 VIL、 H_{45} 增加较快, 平均每个个体扫间隔分别增加 $5.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、0.7km 以上, 且至少出现一次 VIL 跃增 $10\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上; 四是降雹阶段回波顶高、 H_{45} 、VIL 值迅速减少。

(3) “5·12”局部强对流天气过程, 两个风暴单体不同之处: 风暴单体 A3 在孕育阶段快速发展有利于冰雹的形成, 风暴单体 X3 进入孕育期后, 先是各雷达产品长时间维持少变, 后期快速发展满足了降雹预警的临近指标, 孕育期明显增加; 风暴单体 A3 在降雹阶段, R、 H_{45} 、VIL 值先缓慢增大后迅速减少, 降雹期较长, 风暴单体 X3 的 H_{45} 、VIL 值迅速减少,

降雹期较短。风暴单体在孕育、降雹阶段不同的发展演变特点, 对冰雹的形成和维持有明显的影

参考文献:

- [1] 谢启玉, 魏国财. 西宁地区冰雹 VIL 变化特征[J]. 气象科技, 2018, 46(3): 539–544.
- [2] 黄丹萍, 梁岱云, 陆丽安. 南宁冰雹天气类型及预报预警指标[J]. 气象科技, 2020, 48(4): 554–560.
- [3] 刁秀广, 张新华, 朱君鉴, 等. CIMRAD/SA 雷达风暴趋势产品在冰雹和大风预警中的应用[J]. 气象科技, 2009, 37(2): 230–235.
- [4] 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.
- [5] 魏勇, 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): 21–27.
- [6] 希热娜依·铁里瓦尔地, 胡素琴, 玛依热·艾海提, 等. 塔里木盆地西缘两次致灾冰雹环境场和雷达特征对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(3): 16–23.
- [7] 刘昭武, 郝茂生, 龚佃利. 鲁西北地区一次秋季强对流天气的雷达分析[J]. 气象研究与应用, 2020, 41(1): 79–83.
- [8] 李俊河, 耿建军, 张浙妍, 等. 2013 年北京地区一次强对流天气过程分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(2): 25–30.
- [9] 刘希文, 李得勤, 韦惠红, 等. 2013 年湖北地区两次雷暴大风过程环境及雷达回波特征[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(1): 1–10.
- [10] 覃皓, 农孟松, 赖汉珍, 等. 2020 年“1·24”广西大范围冰雹天气过程分析[J]. 气象研究与应用, 2021, 42(1): 107–112.
- [11] 章国材. 强对流天气分析与预报[M]. 北京: 气象出版社, 2011: 153–156, 166.
- [12] 彭建东, 张丽凡, 黄待静. 闽北春季冰雹 CINRAD 雷达产品特征分析[J]. 气象研究与应用, 2018, 39(3): 48–52.
- [13] 王昂生, 黄美元, 徐乃璋, 等. 冰雹云物理发展过程的一些研究[J]. 气象学报, 1980, 38(1): 64–72.
- [14] 许焕斌. 强对流云物理及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2012: 10–11.
- [15] Smith P L, Myers C G, Orville H D. Radar reflectivity factor calculations in numerical cloud models using bulk parameterization of precipitation [J]. J Appl Meteor, 1975 (14): 1156–1165.
- [16] 丁帅, 肖天贵. 延安冰雹多普勒雷达回波特征分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2020, 35(5): 547–553.
- [17] 肖辉, 吴玉霞, 胡朝霞, 等. 旬邑地区冰雹云的早期识别及数值模拟[J]. 高原气象, 2002, 42(1): 159–166.

Radar characteristic analysis of hail process in the Yellow River Delta area

Liu Zhaowu^{1,2}, Tian Shiqin^{1,2}

(1.Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 25003, China;

2.Binzhou Meteorological Bureau, Shangdong Binzhou 256612, China)

Abstract: Based on the product data of the new-generation of weather radar product data, 192 cases of ground hail in the Yellow River Delta during 2016—2020 were statistically analyzed, and the early warning approaching indicators were summarized from the basic reflectivity factor (R), vertical integrated liquid water content (VIL), and vertical integrated liquid water content density (VILD). A local severe convective weather process on 12 May, 2019 was also analysed using these indicators. The results showed that the initial echoes of storm monomer A3 and X3 were mainly generated between 0°C and -20°C layers, the average R and echo height per body sweep interval increased by 5.8 dBZ and 1.8 km or more, respectively in the leapfrog phase. In the breeding stage, the average VIL and strong echo height (H_{45}) per body sweep interval increased by 5.6 kg·m⁻² and 0.7 km or more, respectively, and at least once VIL jump increased by more than 10 kg·m⁻². In the hail drop stage, the echo height, H_{45} and VIL value rapidly reduced, with the obvious life history characteristics of hail cloud. The two storm cells showed different development and evolution characteristics during the gestation and hail suppression phases, which had a clear effect on the formation and maintenance of hail.

Key words: Yellow River Delta; hail on the ground; Early warning approaching indicators; life history characteristics