

赵振东.泰山 CD 与济南 SA 天气雷达探测强冰雹风暴参数对比分析[J].海洋气象学报,2017,37(2):102-108.  
Zhao Zhendong.Intercomparison of parameters of strong hail storms derived from Jinan Radar(SA) and Taishan Radar(CD)[J].  
Journal of Marine Meteorology,2017,37(2):102-108. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.02.013.(in Chinese)

## 泰山 CD 与济南 SA 天气雷达探测强冰雹风暴参数对比分析

赵振东

(泰安市气象局,山东 泰安 271000)

**摘要:**利用泰山 CD 雷达和济南 SA 雷达探测资料,对 2016 年 6 月 13—14 日和 9 月 11 日 4 个长寿命强冰雹风暴参数进行了对比分析。结果表明,4 个强冰雹风暴成熟阶段济南 SA 雷达探测到的 DBZM 值都在 60 dBZ 以上,C-VIL 值基本在  $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  以上, TOP 值基本在 9 km 以上, 0613 平阴风暴和 0614 章丘风暴不仅持续时间相差不多,而且 DBZM、C-VIL、TOP 值基本相近,DBZM 基本在 64 dBZ 以上,最大达到 70 dBZ,C-VIL 基本在  $60 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  以上,最大在  $80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  左右, TOP 值基本在 10.5 km 以上;SA 雷达和 CD 雷达监测到的风暴参数有明显差异,SA 雷达观测到的强风暴 DBZM、C-VIL 和 TOP 值明显大于 CD 雷达观测到的值,特别是 DBZM 和 C-VIL 在风暴强盛阶段差异更加明显,风暴强盛阶段, SA 和 CD 雷达观测到的 0613 阳谷风暴、0613 平阴风暴、0614 章丘风暴和 0911 高青风暴的 DBZM 平均差值分别为 10 dBZ、10 dBZ、9 dBZ 和 7 dBZ,C-VIL 平均差值分别为  $30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $28 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $29 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  和  $28 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。造成强风暴参数差异性的主要因素是大的粒子或者强降雨对 CD 雷达电磁波强烈衰减,同时泰山 CD 雷达的地理环境和观测模式也是原因之一。

**关键词:**强冰雹;天气雷达探测;风暴参数

中图分类号:P412.25 文献标志码:A 文章编号:2096-3599(2017)02-0102-07

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.02.013

## Intercomparison of parameters of strong hail storms derived from Jinan Radar(SA) and Taishan Radar(CD)

ZHAO Zhendong

(Taian Meteorological Bureau, Taian 271000, China)

**Abstract** Based on the data of Taishan Radar(CD) and Jinan Radar(SA), the parameters of four long-life strong hail storms, which occurred on 13-14 Jun., 2016 and 11 Sep., 2016, are compared. The results show that as detected by the SA radar, DBZM values are greater than 60 dBZ, C-VIL values are over  $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , and the TOP values are above 9 km for the 4 strong hail storms at their mature stages. The DBZM, C-VIL, TOP values of 0613 Pingyin storm and 0613 Zhangqiu storm are similar, with DBZM greater than 64 dBZ (maximum value reaches 70 dBZ), C-VIL over  $60 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  (maximum value is  $80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ), and TOP value above 10.5 km at storm mature stages. The parameters derived from SA radar and CD radar respectively have significantly differences. DBZM, C-VIL and TOP derived from SA radar are significantly larger than those from CD radar, especially for DBZM and C-VIL at storm mature stage. For 0613 Yanggu storm, 0613 Pingyin storm, 0614 Zhangqiu storm and 0911 Gaoqing storm at mature stage, the average difference of DBZM are 10 dBZ, 10 dBZ, 9 dBZ and 7 dBZ, respectively, and the average

收稿日期:2016-11-10; 修订日期:2017-06-05

基金项目:山东省气象局重点科研项目(2012sdqzx05)

作者简介:赵振东(1958—),男,工程师,从事天气雷达与网络信息保障工作,ts0538@126.com。

difference of C-VIL are  $30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $28 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $29 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  and  $28 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , respectively. The significant storm parameter differences are mainly generated by severe attenuation on CD radar electromagnetic waves by the large hail particles or the heavy rainfall, and it is also induced by the geographical environment and scan mode of the Taishan Radar.

**Key words** strong hail storms; radar detecting; parameters of storms

## 引言

至2015年底,山东省共有新一代天气雷达8部,其中SA天气雷达6部,SC和CD多普勒天气雷达各1部。济南SA天气雷达于2002年初投入运行。泰山CD天气雷达于2007年初投入运行,是山东省海拔高度最高的天气雷达,其天线馈源海拔高度为1545.8 m。CD和SA雷达虽然波长不同,生产厂家也不同,但观测模式和产品算法是相同的,业务观测模式都采用VCP21体扫模式,即9个仰角扫描方式( $0.5^\circ$ 、 $1.5^\circ$ 、 $2.4^\circ$ 、 $3.4^\circ$ 、 $4.3^\circ$ 、 $6.0^\circ$ 、 $9.9^\circ$ 、 $14.6^\circ$ 、 $19.5^\circ$ )。我国新一代天气雷达的建设与应用推动了强对流天气及相关业务深入细致的研究工作<sup>[1-9]</sup>,大大提高了强对流天气临近预警技术水平,对强对流天气预警及人工影响天气工作发挥了巨大作用。刘雨佳等<sup>[10]</sup>通过泰山CD与济南SA雷达的回波对比分析,发现两部雷达在重叠且基本同距区域内的回波强度存在差异,2007—2010年10次个例3个高度CAPPI回波强度资料的总体对比分析表明,SA雷达均值较CD雷达大2 dBZ左右,同时还指出,SA测量的回波强度均值超过30 dBZ,较强回波(>30 dBZ)所占比例较多时,两部雷达测量相同区域时,会存在相当大的差异,且差异一般随着SA雷达平均回波强度增加而增大。泰山CD雷达2007投入业务应用以来已有9 a之久,积累了大量探测资料,但还没有对冰雹和强降雨风暴的具体应用进行过系统性的分析研究,因此对泰山雷达资料的综合分析应用工作需要进一步加强。

2016年6月13—14日和9月11日,山东部分地区遭受到强冰雹袭击,造成严重经济损失。利用泰山CD雷达和济南SA雷达探测资料,结合天气实况,对6月13—14日和9月11日强冰雹风暴参数进行对比分析,发现两部雷达对强风暴的探测结果差异明显,希望泰山雷达探测资料在今后的实际业务应用中引起有关业务人员的高度重视。

## 1 天气概况

受高空冷涡和地面气旋的共同影响,2016年6

月13—14日,鲁西北西部、鲁中和鲁南的大部分地区出现强对流天气,大风、暴雨、冰雹造成农作物受灾面积132.6千 $\text{hm}^2$ ,成灾面积95.8千 $\text{hm}^2$ ,绝收面积19.4千 $\text{hm}^2$ ,倒塌房屋402间,严重损坏房屋3489间。受低槽和切变线的影响,2016年9月11日,鲁西北东部、鲁中东部和鲁东南地区出现强对流天气,大风和冰雹造成农作物受灾面积13581 $\text{hm}^2$ ,成灾面积9272 $\text{hm}^2$ ,绝收面积952 $\text{hm}^2$ 。

两次强对流过程范围广、强度较强、破坏性大,其中造成严重灾害的强风暴具有历时长、强度强的特征。在济南和泰山雷达共同覆盖的150 km范围内有4个强风暴历时长(生命史超过2 h),并都伴有直径30 mm以上的冰雹。4次强风暴分别为:2016年6月13日造成阳谷强冰雹的风暴(简称0613阳谷风暴)、6月13日造成平阴和肥城强冰雹的风暴(简称0613平阴风暴)、6月14日造成章丘和淄博强冰雹的风暴(简称0614章丘风暴)和9月11日造成惠民、高青、桓台强冰雹的风暴(简称0911高青风暴),见表1。0613阳谷风暴15:40前后生成于莘县境内,东南方向移动,影响阳谷至梁山一带,阳谷冰雹大如鸡蛋,最大冰雹直径超过30 mm,18:00之后风暴消散;0613平阴风暴17:30前后生成于茌平县境内,南偏东方向移动,影响东阿、平阴、肥城,冰雹和大风天气在平阴和肥城造成较大经济损失,最大冰雹直径超过30 mm,19:40之后风暴消散;0614章丘风暴15:30前后生成于齐河县境内,东略偏南方向移动,影响章丘、周村、淄川、青州,冰雹和大风天气在章丘、淄川、青州造成较大经济损失,最大冰雹直径超过30 mm,18:30之后风暴消散;0911高青风暴16:15前后生成于商河县境内,南偏东方向移动,一路影响惠民、高青、桓台,冰雹和大风天气在高青和桓台造成较大经济损失,冰雹大如核桃,最大冰雹直径超过30 mm,19:40之后风暴消散。

表1 强风暴基本情况

Table 1 Strong storm information

日期	时间	主要影响区域	主要天气现象	距 SA/CD 雷达距离/km
2016-06-13	15:40—18:00	阳谷、梁山	冰雹,冰雹大如鸡蛋	120~125/100~130
2016-06-13	17:30—19:40	茌平、肥城	冰雹,大风,冰雹最大直径 >30 mm	50~75/35~85
2016-06-14	15:30—18:30	章丘、青州	冰雹,大风,冰雹大如鸡蛋	20~150/65~120
2016-09-11	16:15—19:40	商河、桓台	冰雹,大风,冰雹大如核桃	80~140/120~130

## 2 风暴参数演变与对比

风暴参数包括最大反射率因子 (DBZM)、基于单体的垂直积分液态水含量 (C-VIL)、单体强中心高度 (HT)、单体顶高 (TOP) 等。图 1 是泰山 CD 雷达和济南 SA 雷达探测到的 4 个强风暴 DBZM、C-VIL、HT 和 TOP 演变情况及各参数平均值,虚线为泰山 CD 雷达资料,实线为济南 SA 雷达资料,黑色、绿色、蓝色和红色分别代表 0613 阳谷风暴、0613 平阴风暴、0614 章丘风暴和 0911 高青风暴。

DBZM 变化表明,SA 雷达监测到的 DBZM 值基本大于 CD 雷达观测到的 DBZM 值,风暴成熟阶段 DBZM 差异更加显著,生成发展阶段除 0613 阳谷风暴外其他 3 个风暴的 DBZM 差别较小,减弱阶段差异有明显缩小趋势 (图 1a)。0613 阳谷风暴 CD 雷达和 SA 雷达监测的 DBZM 平均值分别为 49.4 dBZ 和 57.2 dBZ,相差 7.8 dBZ;0613 平阴风暴 DBZM 平均值分别为 56.5 dBZ 和 64.4 dBZ,相差 7.9 dBZ;0614 章丘风暴 DBZM 平均值分别为 57.5 dBZ 和 64.9 dBZ,相差 7.4 dBZ;0911 高青风暴 DBZM 平均值分别为 55.5 dBZ 和 61.5 dBZ,相差 6.0 dBZ (图 1e)。SA 和 CD 雷达观测到的强盛阶段的 0613 阳谷风暴、0613 平阴风暴、0614 章丘风暴、0911 高青风暴的 DBZM 平均值分别为 61 dBZ、67 dBZ、66 dBZ、63 dBZ 和 51 dBZ、57 dBZ、57 dBZ、56 dBZ,平均差值分别为 10 dBZ、10 dBZ、9 dBZ、7 dBZ (图略),6 月份 3 个强风暴差值较大,而 9 月份强风暴差值相对偏小,泰山 CD 雷达探测到的 DBZM 显著偏小。

风暴生成发展期间 C-VIL 有明显增大现象,减弱消亡阶段有明显下降趋势,但两部雷达所实测的数据有较大差异,济南 SA 雷达数据明显大于同时次 CD 雷达数据 (图 1b);0613 阳谷风暴 SA 和 CD 雷达监测的 C-VIL 平均值分别为  $30.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $11.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,相差  $18.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;0613 平阴风暴 C-VIL 平均值分别为  $56.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $30.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,相

差  $25.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;0614 章丘风暴 C-VIL 平均值分别为  $59.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $31.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,相差  $27.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;0911 高青风暴 C-VIL 平均值分别为  $49.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $23.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,相差  $26.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;4 个强风暴中 0613 平阴风暴和 0614 章丘风暴的 C-VIL 的平均值及演变基本相当,差别不大,而 0613 阳谷风暴的 C-VIL 的平均值明显偏小 (图 1e)。SA 和 CD 雷达观测到的强盛阶段的 0613 阳谷风暴、0613 平阴风暴、0614 章丘风暴、0911 高青风暴的 C-VIL 平均值分别为  $45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $63 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $62 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $52 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $33 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,平均差值分别为  $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (图略),平均差值较大,但差值相对稳定。

HT 数据表明,4 个长寿命风暴演变过程中其强中心高度变化急剧,最高可达 9~10 km,说明该类强风暴具有较高的回波悬垂,利于大冰雹的形成 (图 1c);两部雷达探测到的 HT 有时存在 4~5 km 的差值。0613 阳谷风暴 SA 雷达和 CD 雷达监测的 HT 平均值分别为 5.2 km 和 3.9 km,差值为 1.3 km;0613 平阴风暴 HT 平均值分别为 5.1 km 和 6.1 km,差值为 -1.0 km;0614 章丘风暴 HT 平均值分别为 5.1 km 和 5.0 km,差值为 0.1 km;0911 高青风暴 HT 平均值分别为 4.2 km 和 4.5 km,差值为 -0.3 km (图 1e)。SA 和 CD 雷达观测到的强盛阶段的 0613 阳谷风暴、0613 平阴风暴、0614 章丘风暴、0911 高青风暴的 HT 平均值分别为 5.4 km、5.3 km、5.1 km、4.5 km 和 4.3 km、6.7 km、5.2 km、4.6 km,SA 雷达观测到的 0613 阳谷风暴 HT 平均值比 CD 雷达观测到的 HT 平均值高 1 km 左右,其他 3 个风暴情况正好相反,都是 CD 雷达观测到的 HT 偏高。

TOP 数据表明,4 个长寿命风暴演变过程中其风暴顶高度也存在明显变化现象,最高可达 12 km 以上高度,SA 雷达探测到的 TOP 明显高于 CD 雷达探测到的 TOP 值 (图 1d)。0613 阳谷风暴 SA 雷达和 CD 雷达监测的 TOP 平均值分别为 10.1 km 和

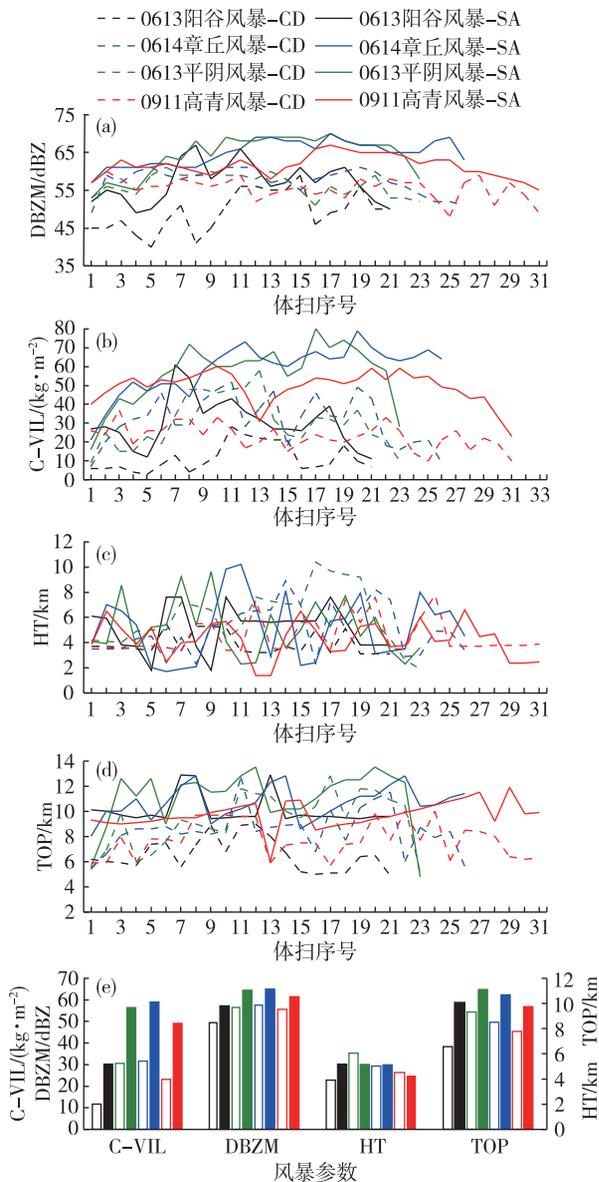


图 1 风暴参数演变 (a. DBZM, b. C-VIL, c. HT, d. TOP, e. 平均值)

Fig.1 Evolution of storm parameters (a. DBZM (maximum reflectivity), b. C-VIL (cell-based vertically integrated liquid), c. HT (height of maximum reflectivity), d. TOP (height of upper most component), e. average values of C-VIL, DBZM, HT and TOP)

6.6 km, 差值为 3.5 km; 0613 平阴风暴 TOP 平均值分别为 11.1 km 和 9.3 km, 差值为 1.8 km; 0614 章丘风暴 TOP 平均值分别为 10.7 km 和 8.5 km, 差值为 2.2 km; 0911 高青风暴 TOP 平均值分别为 9.7 km 和 7.8 km, 差值为 1.9 km(图 1e)。SA 和 CD 雷达观测到的强盛阶段的 0613 阳谷风暴、0613 平阴风暴、0614 章丘风暴、0911 高青风暴的 TOP 平均值

分别为 10.6 km、11.8 km、10.8 km、9.7 km 和 7.8 km、10.0 km、8.7 km、8.0 km, 平均差值分别为 2.8 km、1.8 km、2.1 km、1.7 km(图略), 泰山 CD 雷达观测到的 TOP 值明显偏低。

### 3 原因分析

根据电磁衰减理论, 雨和冰雹对不同波长的电磁波有不同的衰减, 而且有时候差别很大。雨强 50 mm 的强降水对 5.6 cm 和 10 cm 波长的衰减系数分别是  $0.214 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$  和  $0.015 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ , 雨强 100 mm 的强降水对 5.6 cm 和 10 cm 波长的衰减系数分别是  $0.481 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$  和  $0.030 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ ; 直径 1.93 mm 的冰雹, 如果外层有 0.1 mm 的水膜, 5.6 cm 和 10 cm 波长的衰减系数分别是  $0.79 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$  和  $0.15 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ , 如果外层有 0.5 mm 的水膜, 5.6 cm 和 10 cm 波长的衰减系数分别是  $2.48 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$  和  $0.34 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ [11], 无论是大冰雹或者是强降雨, CD 雷达的电磁衰减明显大于 SA 雷达。

图 2 是 4 次强风暴几个时次的济南 SA 雷达组合反射率因子 (CR37) 和泰山 CD 雷达组合反射率因子 (CR38) 产品, SA 雷达 CR37 和 CD 雷达 CR38 产品唯一差别是显示距离的差异, CR37 最大显示距离是 230 km, CR38 最大显示距离是 250 km。6 月 13 日 17:34 济南雷达产品风暴属性显示, 0613 平阴风暴 Q1 的  $\text{DBZM} = 53 \text{ dBZ}$ ,  $\text{HT} = 4.1 \text{ km}$ ,  $\text{TOP} = 5.6 \text{ km}$ ,  $\text{C-VIL} = 16 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 2a), 17:35 泰山雷达产品风暴属性显示, 0613 平阴风暴 M5 的  $\text{DBZM} = 53 \text{ dBZ}$ ,  $\text{HT} = 4.2 \text{ km}$ ,  $\text{TOP} = 5.3 \text{ km}$ ,  $\text{C-VIL} = 9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 2b), 虽然时间略有差异, 但风暴参数 DBZM、HT、TOP 值基本相当。0613 阳谷风暴在减弱阶段后面 3 个体扫 HT 大致相当(图 1c), DBZM 相差较小或者相同(图 1a), 只是 TOP 差别较大。两部雷达观测到的同一风暴的 HT 和 TOP 值基本相当, 同时 DBZM 相差较小或者相同, 说明两部雷达所获取的数据质量或者说是雷达探测性能基本相同, 产品数据是可信的, 而 C-VIL 值有差别, 原因之一是泰山雷达处于较高的海拔高度, 无法获取近地层的数据, 或者是 TOP 值有明显差异。

9 月 11 日 18:28 济南雷达产品风暴属性显示, 0911 高青风暴 M6 的  $\text{DBZM} = 65 \text{ dBZ}$ ,  $\text{HT} = 5.3 \text{ km}$ ,  $\text{TOP} = 9.1 \text{ km}$ ,  $\text{C-VIL} = 51 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 2c), 18:28 泰山雷达产品风暴属性显示, 0911 高青风暴 P3 的  $\text{DBZM} = 58 \text{ dBZ}$ ,  $\text{HT} = 5.6 \text{ km}$ ,  $\text{TOP} = 7.6 \text{ km}$ ,  $\text{C-VIL} = 20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 2d)。可以看出, 同一时间济南 SA 雷

探测到的风暴基本呈圆形,而泰山 CD 雷达探测到的风暴呈扁状,风暴后部出现弱的回波,是大的冰雹粒子衰减造成的回波失真。风暴参数 HT 基本相当,而 DBZM、C-VILZ、TOP 有明显差别,风暴与泰山站之间没有其它风暴,因此 DBZM 差别是冰雹造成的强衰减;济南 SA 雷达 TOP 值是 9.1 km,对应

仰角为  $4.3^\circ$ ,泰山 CD 雷达 TOP 值是 7.6 km,对应仰角为  $2.4^\circ$ 。 $3.4^\circ$  仰角风暴上空所对应的高度是 9.7 km,考虑到波瓣宽度(上下各  $0.5^\circ$ ,121 km 处波束可展宽到 2 km 左右),泰山雷达  $3.4^\circ$  仰角也能扫描到风暴上空 9 km 高度,因此泰山雷达观测到的 TOP 值明显偏低最大的可能性是电磁衰减所致。

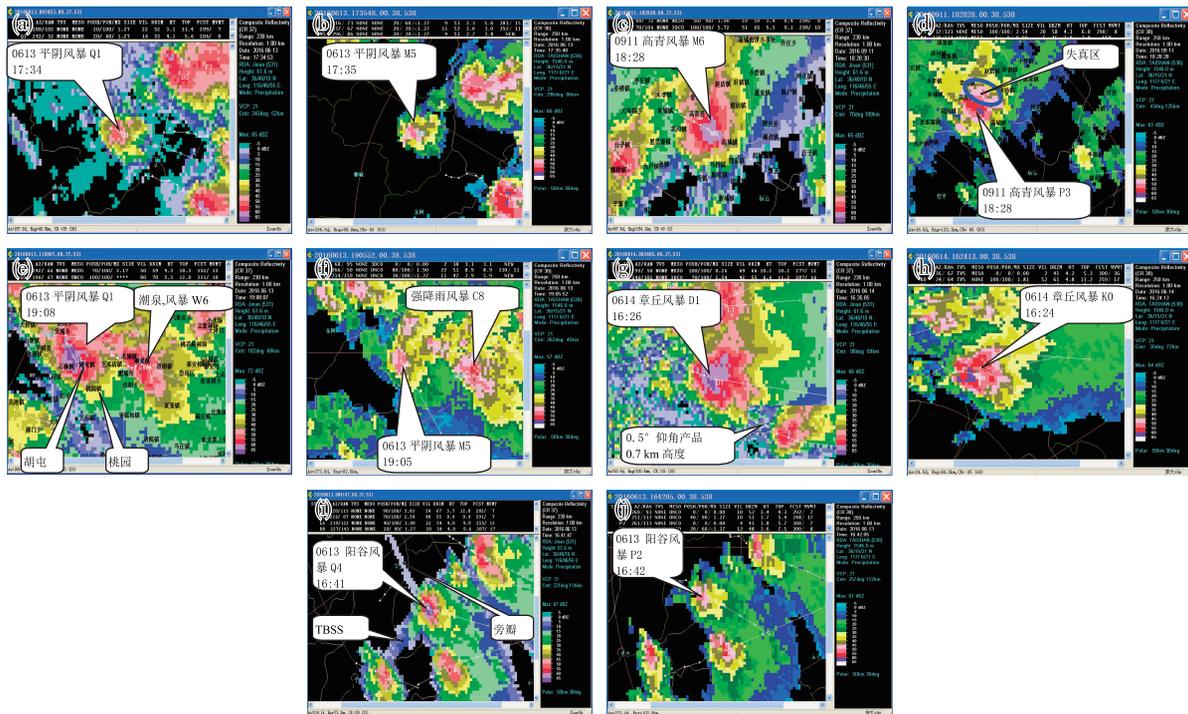


图2 强风暴 SA 组合反射率因子(CR37)和 CD 组合反射率因子(CR38) (a.6月13日 17:34 CR37, b. 6月13日 17:35 CR38, c.9月11日 18:28 CR37, d. 9月11日 18:28 CR38, e.6月13日 19:08 CR37, f. 6月13日 19:05 CR38, g.6月14日 16:26 CR37, h.6月14日 16:24 CR38, i.6月13日 16:41 CR37, j.6月13日 16:42 CR38)

Fig.2 Composite reflectivity product of Jinan Radar(SA, CR37) at (a) 17:34 BST 13 Jun. 2016, (c) 18:28 BST 11 Sep. 2016, (e) 19:08 BST 13 Jun. 2016, (g) 16:26 BST 14 Jun. 2016 and (i) 16:41 BST 13 Jun. 2016. Composite reflectivity product of Taishan Radar (CD, CR38) at (b) 17:35 BST 13 Jun. 2016, (d) 18:28 BST 11 Sep. 2016, (f) 19:05 BST 13 Jun. 2016, (h) 16:24 BST 14 Jun. 2016 and (j) 16:42 BST 13 Jun. 2016

6月13日 19:08 济南雷达产品风暴属性显示, 0613 平阴风暴 Q1 的 DBZM = 70 dBZ、HT = 5.3 km、TOP = 12 km、C-VIL =  $80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 19:05 泰山雷达产品风暴属性显示, 0613 平阴风暴 M5 的 DBZM = 51 dBZ、HT = 10.4 km、TOP = 10.4 km、C-VIL =  $22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 19:11 体扫的 DBZM = 56 dBZ、HT = 9.7 km、TOP = 12.8 km、C-VIL =  $33 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。两部雷达观测到的同一风暴的风暴参数差别明显, HT 相差约 5 km, DBZM 相差约 14 dBZ 以上, C-VIL 差别更大。18:50—19:30 在泰山雷达站和 0613 平阴风暴之间有强降水风暴 W6 影响(图 2c), 肥城市潮泉区域站在 19:00—19:30 降水量为 56.5 mm, 小时雨强 > 110 mm。强风暴 Q1 经过肥城市胡屯和桃园时也产生

强降水, 胡屯区域站在 19:13—19:30 之间降水量为 32.3 mm, 桃园区域站在 19:21—19:36 之间降水量为 28.8 mm, 小时雨强 > 110 mm, 风暴 Q1 除产生大冰雹外还产生较强的降雨。因此, 造成 0613 平阴风暴 HT 和 DBZM 数据差别较大的主要原因是: 由于强降雨和大的冰雹粒子的共同衰减, 泰山雷达探测到 0613 平阴风暴中低层时电磁能量严重衰减而造成数据严重失真, 而高层衰减相对较弱, 探测到中高层的数据相对可靠。

6月14日 16:26 济南雷达产品风暴属性显示, 0614 章丘风暴 D1 的 DBZM = 66 dBZ、HT = 10.2 km、TOP = 10.2 km、C-VIL =  $69 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 16:24 泰山雷达产品风暴属性显示, 0614 章丘风暴 K0 的 DBZM = 61

dBZ、HT = 6.3 km、TOP = 12.8 km、C-VIL = 52 kg·m<sup>-2</sup>。两部雷达观测到的同一风暴的风暴参数差别明显,HT 相差约 4 km, TOP 相差约 2.6 km, DBZM 相差约 5 dBZ, C-VIL 相差 17 kg·m<sup>-2</sup>。此时 0614 章丘风暴距济南雷达距离是 58 km, 6.0°仰角风暴上空所对应的高度是 6.4 km(对应的最大反射率因子为 65 dBZ), 9.9°仰角对应的高度是 10.2 km, 9.9°仰角之上扫描仰角 14.6°所对应的高度是 15.5 km, 因此, 由于上层仰角间隔较大, 济南雷达无法观测到风暴上空 12.8 km 高度数据; 0614 章丘风暴距泰山雷达距离是 64 km, 9.9°仰角观测到的是风暴上空 12.9 km 高度, 6.0°仰角对应的高度是 8.6 km, 同样, 由于上层仰角间隔较大, 泰山雷达无法观测到风暴上空 10.2 km 高度数据; 因此, 此时济南雷达观测到的 DBZM 和 HT 数据更加可靠, 而泰山雷达观测 TOP 数据更加真实, 同一高度 CD 雷达观测到的最大反射率因子值小于 SA 雷达观测到的数值, 有两种可能, 时间略有差异而造成的反射率因子值的波动或者大的粒子对短波长电磁波的衰减所致。

图 2i 和图 2j 分别是 0613 阳谷风暴 16:41SA 雷达和 16:42CD 雷达 CR 产品, 可以看出, 济南雷达产品显示, DBZM = 67 dBZ、HT = 3.7 km、TOP = 12.8 km、C-VIL = 54 kg·m<sup>-2</sup>, 同时还出现明显的旁瓣回波和三体散射(TBSS)回波, 实际上这种现象从 16:35—17:05 连续 6 个体扫一直存在, 说明风暴内部存在较大的冰雹粒子而且维持时间较长, 虽然地面实况冰雹直径不详, 但大如鸡蛋, 最大冰雹直径至少在 30 mm 以上; 泰山雷达产品显示, DBZM = 41 dBZ、HT = 5.3 km、TOP = 7.3 km、C-VIL = 4 kg·m<sup>-2</sup>, 两者的差异非常大, 特别是 DBZM 相差 26 dBZ, 前后几个体扫一直存在较大差异。从图上也可以直观地看到, 0613 阳谷风暴在两部雷达上差异显著, 而阳谷风暴周围的其他 3 个风暴差异却不是很大, 3 个风暴都有 55 dBZ 左右的反射率因子, 因此, 0613 阳谷风暴强度差异显著的唯一解释是更大的冰雹粒子对 C 波段电磁波强烈吸收衰减造成的。

4 个强风暴旺盛阶段都出现三体散射或旁瓣回波现象(0911 高青风暴在潍坊 SA 雷达上有旁瓣回波, 其他 3 个风暴在济南 SA 雷达上出现三体散射或旁瓣回波), 说明风暴内部存在较大的冰雹粒子。强风暴最大反射率因子较大差异的主要因素是大的冰雹粒子或强降雨对 CD 雷达电磁波产生的明显衰减作用, 由于强的衰减, 使得 CD 雷达探测到的风暴强度和强回波面积以及风暴顶部高度严重失真,

特别是强风暴与雷达之间存在强降雨时, 强风暴中层以下高度回波减弱更加严重, 从而也导致基于单体风暴参数(反射率因子、风暴底和风暴顶)计算出来的 C-VIL 数据明显偏小。两部雷达天线海拔高度差异较大, 泰山雷达无法探测到风暴低层的信息, 尤其是距离越远, 探测到的最低高度越高, 100 km 距离探测到的风暴最低高度是 3.1 km, 因此, 也是导致 C-VIL 偏小的原因之一。一般而言, 强风暴旺盛阶段存在较深厚的回波墙和较高的回波悬垂, 同一时次两部雷达观测到的强风暴部位不一致, 考虑到衰减作用, SA 雷达上相同反射率因子在 CD 雷达上可能表现的不一样, 也就导致 HT 和 TOP 的差异。

#### 4 结论

1) 4 个强冰雹风暴具有较大的反射率因子、较大的垂直积分液态含水量和较高的风暴顶高度, 风暴成熟阶段济南 SA 雷达探测到的 DBZM 值都在 60 dBZ 以上, C-VIL 值基本在 50 kg·m<sup>-2</sup> 以上, TOP 值基本在 9 km 以上, 0613 平阴风暴和 0614 章丘风暴不仅持续时间相差不多, 而且 DBZM、C-VIL 和 TOP 值相近, DBZM 基本都在 64 dBZ 以上, 最大达到 70 dBZ, C-VIL 基本在 60 kg·m<sup>-2</sup> 以上, 最大在 80 kg·m<sup>-2</sup> 左右, TOP 值基本在 10.5 km 以上。

2) SA 雷达和 CD 雷达监测到的风暴参数有明显差异, SA 雷达观测到的强风暴 DBZM、C-VIL 和 TOP 值明显大于 CD 雷达观测到的值, 特别是 DBZM 和 C-VIL 在风暴强盛阶段差异更加明显。生成发展阶段除 0613 阳谷风暴外, 其他 3 个风暴的 DBZM 差别较小, 减弱阶段差异有明显缩小趋势。风暴强盛阶段, SA 和 CD 雷达观测到的 0613 阳谷风暴、0613 平阴风暴、0614 章丘风暴和 0911 高青风暴的 DBZM 平均差值分别为 10 dBZ、10 dBZ、9 dBZ 和 7 dBZ, C-VIL 平均差值分别为 30 kg·m<sup>-2</sup>、28 kg·m<sup>-2</sup>、29 kg·m<sup>-2</sup> 和 28 kg·m<sup>-2</sup>, TOP 平均差值分别为 2.8 km、1.8 km、2.1 km 和 1.7 km, HT 平均差值分别为 1.1 km、-1.4 km、-0.1 km 和 -0.2 km。

3) 造成强风暴参数差异性的主要因素是大的粒子或者强降雨对 CD 雷达电磁波强烈衰减, 同时泰山 CD 雷达的地理环境和观测模式也是原因之一。风暴发展或减弱阶段, 风暴强度偏小, CD 雷达对电磁波的衰减相对也弱些; 风暴强盛阶段, 风暴强度较强, 强回波对 C 波段电磁波衰减更加明显, 造成两部雷达观测到的回波强度差异更加明显。如果 CD 雷达与强冰雹风暴之间有强降雨风暴, 会

造成的更加严重的衰减;衰减作用引起的风暴反射率因子的减弱,会导致 C-VIL 明显偏小和 TOP 明显偏低。

### 参考文献:

- [1] 朱君鉴,郑国光,王令,等.冰雹风暴中的流场结构及大冰雹生成区[J].南京气象学院学报,2004,27(6):735-742.
- [2] 朱君鉴,刁秀广,曲军,等.4.28 临沂强对流灾害性大风多普勒天气雷达产品分析[J].气象,2008,34(12):21-26.
- [3] 刁秀广,朱君鉴,黄秀韶,等.VIL 和 VIL 密度在冰雹云判据中的应用[J].高原气象,2008,27(5):1131-1139.
- [4] 刁秀广,朱君鉴,刘志红.三次超级单体风暴雷达产品特征及气流结构差异性分析[J].气象学报,2009,67(1):133-146.
- [5] 刁秀广,张新华,朱君鉴.CINRAD/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):230-233.
- [6] 刁秀广,赵振东,高慧君,等.三次下击暴流雷达回波特征分析[J].气象,2011,37(5):522-531.
- [7] 刁秀广,万明波,高留喜,等.非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征及预警[J].气象,2014,40(6):668-677.
- [8] 万明波,刁秀广,杨晓霞,等.“2011.07.25”山东乳山强降水中尺度分析[J].山东气象,2015,35(2):21-27.
- [9] 陈善炳,陈叶婷,李红梅.“9.21”山东半岛南部沿海强降水的中尺度分析[J].山东气象,2015,35(2):15-20.
- [10] 刘雨佳,陈洪滨,朱君鉴.山东省 S 波段与 C 波段天气雷达回波强度的对比分析[J].气象科学,2014,34(1):87-95.
- [11] 李柏,俞小鼎.天气雷达及其应用[M].北京:气象出版社,2011:4-5.