

朱君鉴, 苏添记, 龚佃利, 等. 两次森林火灾的双偏振雷达探测特征分析[J]. 海洋气象学报, 2024, 44(3): 14-22.
ZHU Junjian, SU Tianji, GONG Dianli, et al. Analysis on detection characteristics of two forest fires using dual-polarization radars [J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(3): 14-22. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20230129002. (in Chinese)

两次森林火灾的双偏振雷达探测特征分析

朱君鉴¹, 苏添记², 龚佃利³, 张持岸⁴, 孙剑⁴

(1. 山东省气象台, 山东 济南 250031; 2. 烟台市气象局, 山东 烟台 264003; 3. 山东省人民政府人工影响天气办公室, 山东 济南 250031; 4. 华云敏视达雷达(北京)有限公司, 北京 100094)

摘要 通过对2020年3月17日山东烟台、4月23日山东青岛发生的两次森林火灾的双偏振雷达探测资料进行分析, 结果表明: (1) 森林火灾燃烧产生的灰烬上升到空中, 随环境风向下风方飘散, 形成烟羽, 烟羽的雷达反射率因子在20 dBZ左右, 火灾点上空很小范围最大值达36 dBZ。(2) 两次山火的灰烬飘浮物随环境风向下风扩散的最远距离分别是65 km和94 km, 最高上升高度分别达3.7 km和4.8 km。(3) 追踪烟羽的前沿可以估算相应高度上环境风的速度; 两次火灾都发生在晴天, 环境风速不大, 除了烟羽边缘位置速度谱宽值较大外, 其余部分速度谱宽都很小, 大部分为 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。(4) 相关系数(C_c)、差分反射率(Z_{DR})和差分相移(Φ_{DP})探测到的范围与雷达反射率因子的演变形态和面积接近, 同样随烟羽的扩散而逐渐增大; C_c 值非常小, 大多数区域小于0.9, 少数距离库库元的 C_c 值低于0.5; 火灾点上空的 Z_{DR} 值有相对较小的区域, 为2~3 dB, 而火灾点下风方, 大部分 Z_{DR} 值都很大, 大多超过5 dB。(5) 两次森林火灾的双偏振探测特征表明, 产生回波的反射物主要是干草、松针等燃烧后的灰烬形成的水平尺度较大的非球形粒子反射物。

关键词 山火烟羽; 双偏振雷达; 相关系数(C_c); 差分反射率(Z_{DR}); 探测特征

中图分类号: P412.25 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2024)03-0014-09

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20230129002

Analysis on detection characteristics of two forest fires using dual-polarization radars

ZHU Junjian¹, SU Tianji², GONG Dianli³, ZHANG Chian⁴, SUN Jian⁴

(1. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China; 2. Yantai Meteorological Bureau, Yantai 264003, China; 3. Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031, China; 4. HuaYun METSTAR Radar (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract Two forest fires occurred in Yantai and Qingdao, Shandong on 17 March and 23 April 2020, respectively, and the detection data using dual-polarization radars are analyzed. The results are as follows. (1) Ashes from forest fires rise up into the air and drift downstream to form a smoke plume, whose radar reflectivity is around 20 dBZ, with a maximum of 36 dBZ in the small range above the fire spot. (2) The farthest distance of the two wildfires' floating objects spreading downstream in the environmental wind direction is 65 km and 94 km, respectively, and the highest rising height reaches 3.7 km and 4.8 km, respectively. (3) The environmental wind speed of corresponding altitude can be estimated by tracking the plume's front edge. Both wildfires occur on sunny days, the environmental wind speed is not large,

收稿日期: 2023-01-29; 修回日期: 2023-07-25

基金项目: 山东省气象局科研项目(2021sdqx09)

第一作者简介: 朱君鉴, 男, 正高级工程师, 主要从事雷达气象学研究, 2894380621@qq.com。

and except for the large velocity spectrum width at the plume's edge, the velocity spectrum width is very small, mostly at $1\text{--}2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. (4) The ranges detected by correlation coefficient (C_c), differential reflectivity (Z_{DR}) and differential phase shift (Φ_{DP}) are close to the evolution and area of the radar reflectivity, and also increase gradually along with the diffusion of the plume. The value of C_c is very small with the values of most sites less than 0.9 and the values of a few range bins under 0.5. There is a part of relatively small Z_{DR} over the fire spot between 2 dB and 3 dB, while in the downwind direction, Z_{DR} is large, mostly over 5 dB. (5) The detection characteristics of the two forest fires using dual-polarization radars show that the reflectors of generating echoes are mainly non-spherical particle reflectors with large horizontal scale produced by ashes such as hay and pine needles.

Keywords smoke plume of wildfire; dual-polarization radar; correlation coefficient (C_c); differential reflectivity (Z_{DR}); detection characteristics

引言

森林火灾对山林生态系统具有巨大的破坏性,严重的森林火灾还会危及人的生命安全,造成大气污染等。森林火灾突发性强、破坏性大,一旦蔓延,处置扑救非常困难。早期发现森林火灾,将其扑灭在初始阶段是避免重大森林火灾的有效措施。为此,人们研究开发了利用卫星遥感、视频监控、小型无人驾驶飞机等多种监测方法和技术对森林火灾进行监测和预警^[1-3]。

中国气象局布网建设的新一代天气雷达,主要是为探测大气中的水成物而设计的,在暴雨、冰雹、龙卷、雷雨大风等灾害性天气探测和预警中发挥着非常重要的作用。但事实上雷达探测到的目标物并不都是水成物,如高大的山脉和建筑物产生的地物回波、迁徙飞行的鸟类和昆虫的回波、被龙卷卷到空中的杂物碎片回波、由于大气波导产生的超折射回波、三体散射产生的虚假回波等等。这些非水成物产生的回波“污染”了雷达探测资料,对雷达定量估测降水等多方面的应用带来干扰。诸多研究^[4-6]证明,雷达探测到的这些非降水目标物在气象和其他领域也得到了很好的应用,其中天气雷达在监测森林火灾方面就是代表性应用。

在早期,利用双偏振雷达探测到火灾之前,有研究^[7-9]认为由火灾高热造成的湍流涡旋的布拉格散射(Bragg scattering)是火灾烟羽反射能量中的重要组成部分。2008年3月12日,Melnikov等^[10]利用S波段双偏振雷达探测到俄克拉荷马一次火灾回波的相关系数(C_c)小于0.4,差分反射率(Z_{DR})有较高的正值,表明在火灾烟羽中存在水平方向尺度比垂直方向大的反射物,由此判断火灾雷达回波的来源主要是非球形颗粒的后向散射,并指出基于这一特征

可以利用双偏振雷达识别森林火灾的发生,尤其在阴天发生的野外火灾,卫星遥感及其他探测方法难以发现的时候,双偏振雷达可发挥重要作用。

在火灾点附近,大火高温产生强局部浮力,燃灰颗粒、部分燃烧过的碎片会上升而飘浮到大气中^[7,11]。这些颗粒的大小可能超过几毫米,在火灾产生的烟柱中停留几分钟到一小时^[1]。Jones等^[12]探测到火灾最强时,烟柱中灰烬碎片在大气层中上升到5 km高度,烟雾和碎片悬浮在大气中可以持续数小时,在大火的下风方影响范围超过100 km。

自中国新一代天气雷达业务网建设以来,利用天气雷达对森林火灾的探测和预警已有不少研究^[13-15],有专家研究开发了雷达监测火灾的应用软件^[16-17]。近年来,中国的新一代天气雷达正逐步升级改造造成双偏振多普勒天气雷达(以下简称“双偏振雷达”),依据双偏振雷达给出的 C_c 、 Z_{DR} 、差分相移(Φ_{DP})、差分相移率(K_{DP})等双偏振参量,可用于分析判别不同相态的气象目标物或非气象目标物^[18-20],为提升雷达探测森林火灾的能力提供了良好的技术支持。

2020年3月17日、4月23日,山东的烟台和青岛先后发生森林火灾,烟台、青岛两部双偏振雷达探测到了这两次山火过程。本研究详细分析了这两次山火的双偏振参量特征,可为利用中国业务布网的双偏振雷达探测森林火灾提供观测分析依据。

1 两次森林火灾概况

2020年3月17日,因村民不慎将烟头掉落草丛,引发烟台市牟平区水道镇薛家夼村西山发生山林火灾(以下简称“牟平山火”)。山东省气候中心基于卫星监测资料,分析发现3月17日15:40(北京时间,下同)烟台市牟平区水道镇发生森林火情。

利用3月11日(过火前)和3月20日(过火后)高分六号16 m正射校正后的卫星影像数据,根据着火前后过火区域在光谱信息、影像颜色和纹理等方面的显著差异,得到过火区范围为 $121.51^{\circ}\sim 121.54^{\circ}\text{E}$ 、 $37.19^{\circ}\sim 37.26^{\circ}\text{N}$,估算过火区域面积为 11 km^2 。

2020年4月23日14:30左右,因操作人员违规焊接作业引燃周围枯草,导致青岛市黄岛区小珠山发生火灾(以下简称“黄岛山火”)。山东省气候中心根据卫星监测分析,确定4月23日14:10青岛市黄岛区(120.068°E , 35.954°N)出现火灾点,下垫面类型为山地和林地,其间最大热点面积约为 7 km^2 。对比分析4月13日(过火前)和4月25日(过火后)高分六号16 m卫星影像数据,估算过火区域面积为 12 km^2 。

2 雷达资料

研究使用的雷达资料来自业务运行的烟台、青岛S波段双偏振雷达,探测记录了山火从发生到熄灭的全过程。雷达扫描模式是VCP21D,仰角从 0.5° 到 19.5° 共9层, 0.5° 和 1.5° 两层分别使用1 014 Hz和322 Hz脉冲重复频率做2次扫描,得到460 km内的雷达反射率因子和230 km内的径向速度,体扫更新时间约为6 min。分析软件是CINRAD/SA-D的产品生成软件(ROSE版本的RPG)。

3 牟平山火的雷达探测特征

3.1 雷达反射率因子特征

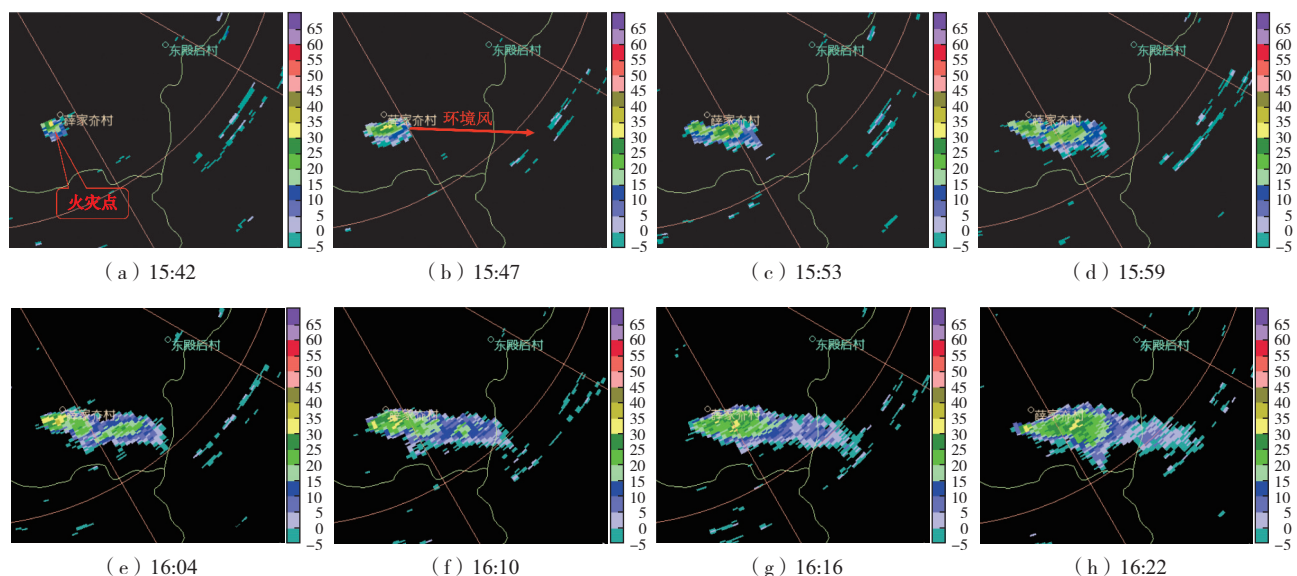
图1为2020年3月17日15:42—17:07烟台双偏振雷达 1.5° 仰角反射率因子(Z)的时间序列,

可以清楚地显示山火烟羽的飘散状况。山火发生后,15:42,1.5 km高度(1.5° 仰角)出现长宽大约各4.5 km范围的烟羽, Z 最大值为35 dBZ,之后烟羽随环境风西风向下方飘移,面积逐渐扩大。15:59,烟羽回波长度增至15 km,宽度增至6 km, Z 最大值为30 dBZ。16:04,火灾点上空 Z 值最大,为36 dBZ,长度增至20 km。16:22,长度增至29 km,16:04—16:22火灾点上空 Z 最大值变化不大,为33 dBZ左右。16:28之后,烟羽范围继续增大, Z 逐渐减弱。17:07之后,探测不到烟羽。跟踪 0.5° 仰角 Z ,17:48,还能看到火灾烟尘的残余回波(图略),这时烟尘的前缘距离火灾点大约为65 km(最远距离),烟羽在空中维持了126 min。

3.2 烟羽的径向速度和速度谱宽特征

图2为烟台双偏振雷达 1.5° 仰角15:42、16:04、16:28、16:50的径向速度。可见,径向速度的范围与 Z 的范围大致一致,径向速度值很低,为 $4\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (正速度)。如果把烟羽看作示踪物,烟羽前沿距离雷达约为34 km, 1.5° 仰角雷达波束中心高度约为2.2 km,可以估算出该高度偏西风约为 $8.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,烟羽前沿的雷达方位角约为 130° ,投影到雷达探测波束的径向速度约为 $6.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。可见,在火灾点烟羽刚刚生成之后,将烟羽前沿看作示踪物可以大致推算该高度的环境风速。

图3为烟台雷达 1.5° 仰角15:42、16:04、16:28、16:50的速度谱宽产品。可见,谱宽产品的形态与同时次径向速度的形态基本一致,除了边缘位置外,谱宽值都很小,大部分为 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。



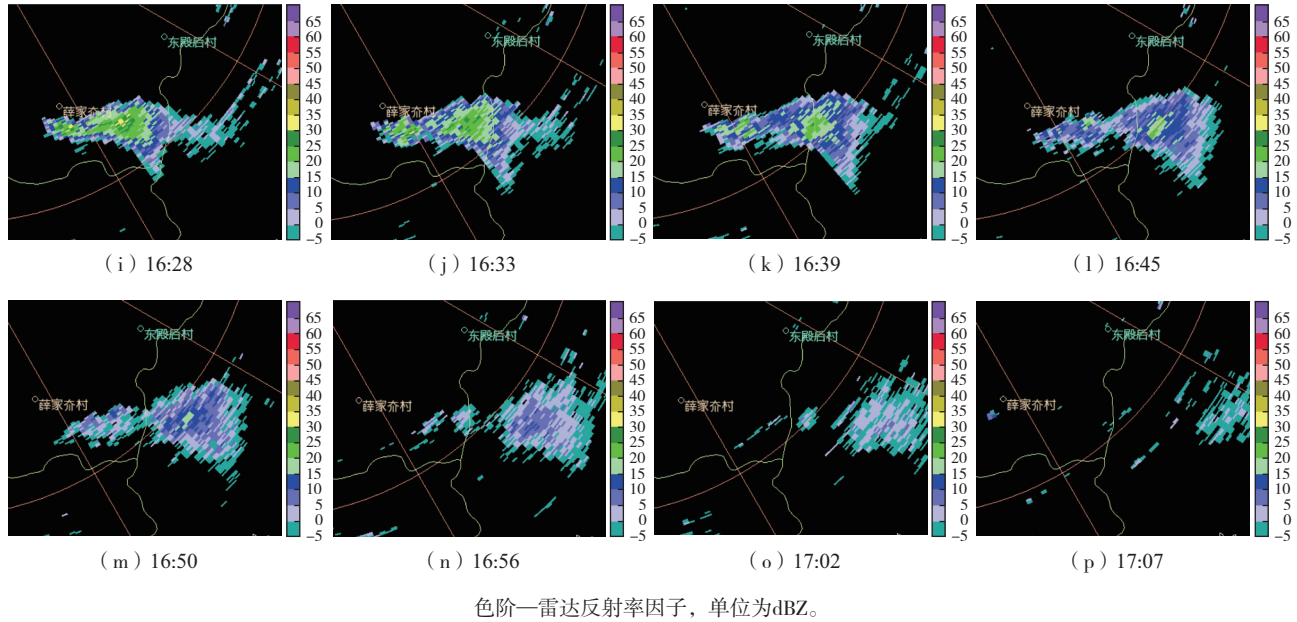


图1 2020年3月17日烟台雷达1.5°仰角反射率因子时间序列
Fig.1 Times series of reflectivity from Yantai radar at 1.5° elevation on 17 March 2020

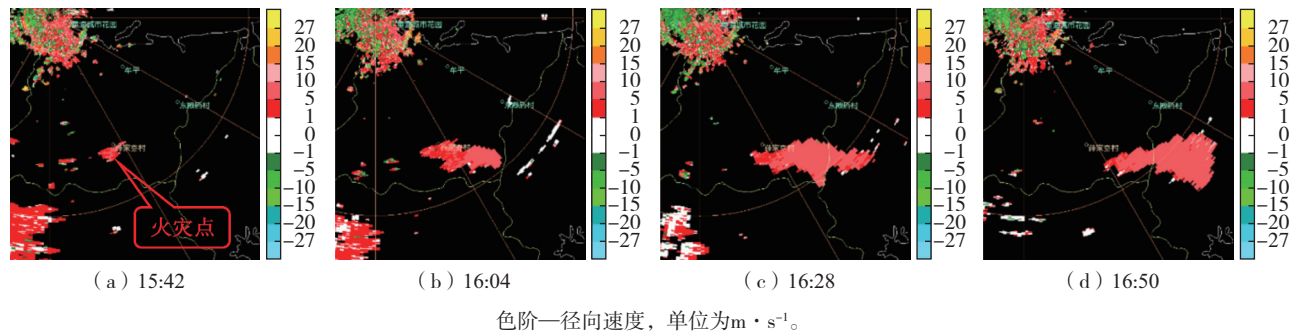


图2 2020年3月17日烟台雷达1.5°仰角径向速度
Fig.2 Radial velocity from Yantai radar at 1.5° elevation on 17 March 2020

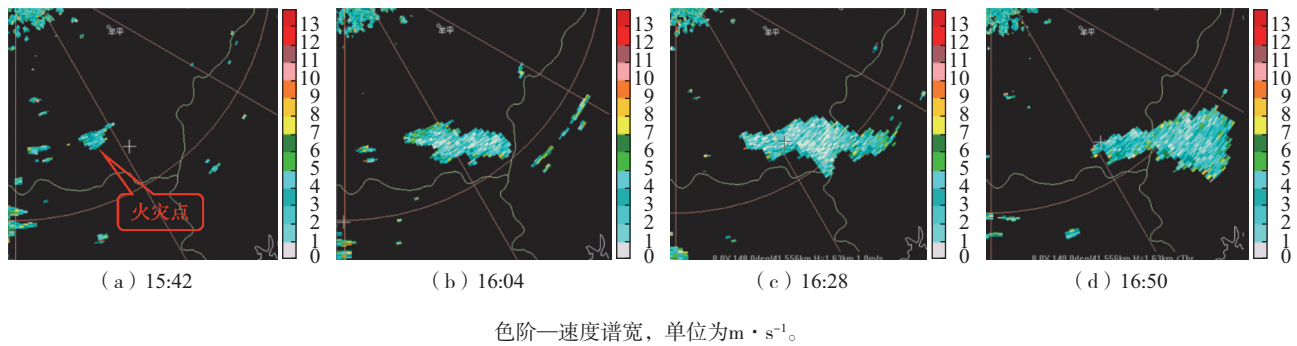


图3 2020年3月17日烟台雷达1.5°仰角速度谱宽
Fig.3 Velocity spectrum width from Yantai radar at 1.5° elevation on 17 March 2020

3.3 山火烟羽的双偏振参数特征

图4给出了2020年3月17日15:42、16:04、16:28和16:56烟台双偏振雷达火灾点上空1.5°仰角的 Z 、 C_c 、 Z_{DR} 和 Φ_{DP} 。由1.5°仰角 Z (图4a、e、i、m)可

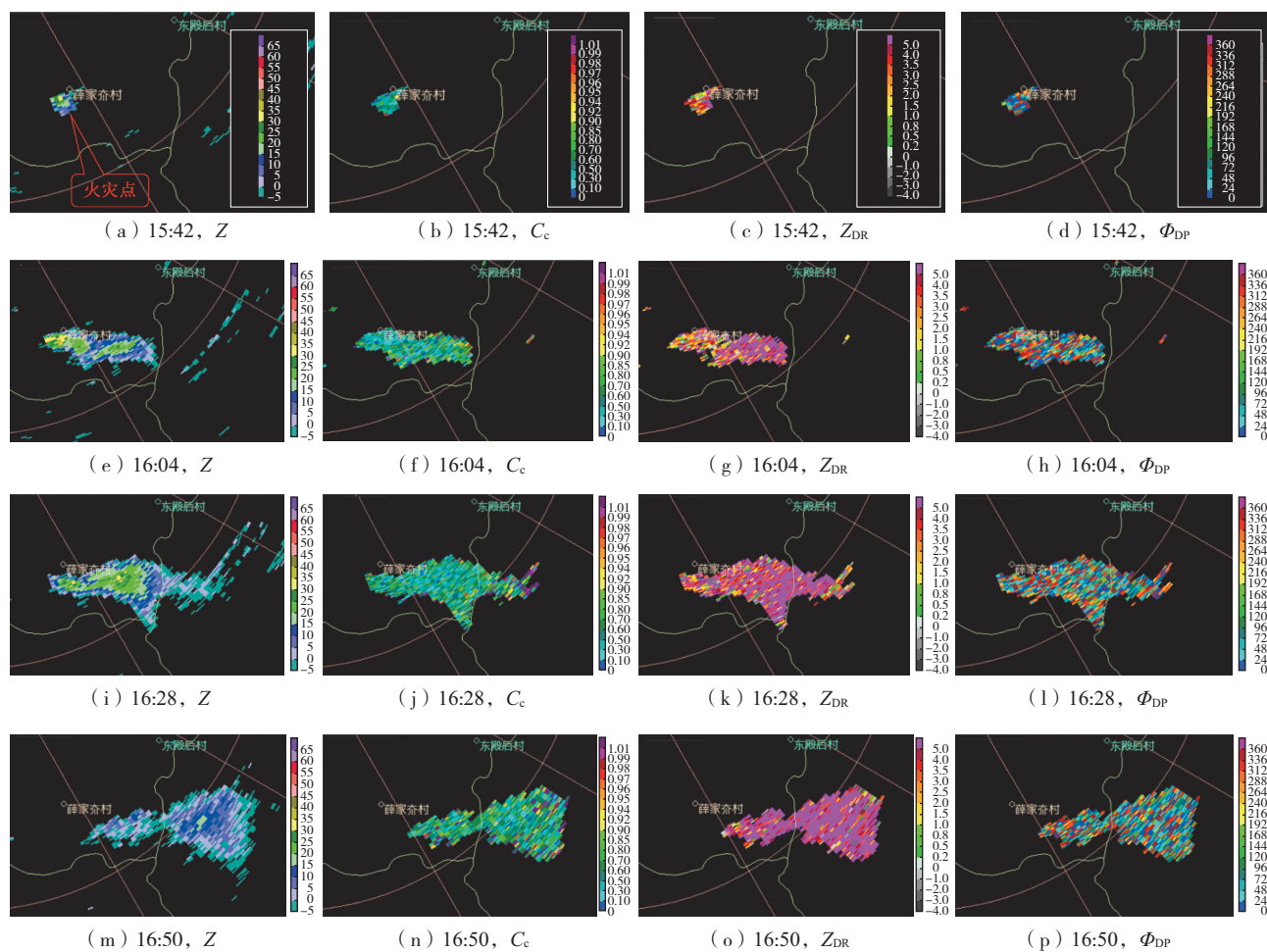
以看到,烟羽在大气中扩散,烟羽面积随时间逐渐增大; Z 的强度在16:04达到最大,为36 dBZ,16:33之后明显减弱(火灾被扑灭之后)。

烟羽的 C_c (图4b、f、j、n)、 Z_{DR} (图4c、g、k、o)与 Z 的

形态和面积非常接近,同样随时间逐渐增大。 C_e 值非常小,大多小于0.9,很多距离库库元的 C_e 值低于0.5。火灾点上空的 Z_{DR} 值有相对较小的部分,为2~3 dB,下风方的 Z_{DR} 值很大,大部分达到5 dB。推测原因为:火灾点正上方,上升气流较强、温度较高,烟柱内湍流很强,灰烬的排列相对不规则,所以 Z_{DR} 值不高;而到火灾

点的下风随着上升速度减弱,灰烬开始下落,下落过程中水平方向尺度大的灰烬受到较大的空气阻力,因此能较长时间飘留在空中,因此 Z_{DR} 值很大。

烟羽的 Φ_{DP} 值(图 4d、h、l、p)变化范围很大,小值甚至小于 10° ,大值大于 300° ,分布杂乱无章,类似噪声分布。



a、e、i、m 中色阶— Z , 单位为 dBZ; b、f、j、n 中色阶— C_e ; c、g、k、o 中色阶— Z_{DR} , 单位为 dB;

d、h、l、p 中色阶— Φ_{DP} , 单位为 $(^\circ)$ 。

图4 2020年3月17日火灾点上空烟台雷达双偏振参量

Fig.4 Dual-polarization parameters from Yantai radar above the fire spot on 17 March 2020

图5给出的是16:04火灾点上空烟台雷达5层仰角平面的弱回波区(weak echo region, WER)产品,每个窗口平面的左侧由上至下标有探测时间、仰角和窗口中心高度。该产品是RPG软件基于平面位置显示(plan position indicator, PPI)产品,按用户选定区域给出的不同仰角的 Z 、 C_e 、 Z_{DR} 和 Φ_{DP} 。5层仰角依次为 0.5° 、 1.5° 、 2.4° 、 3.3° 、 4.3° ,对应火灾点位置的高度接近于窗口中心高度,分别是0.8、1.6、2.2、2.8、3.6 km。由图5a可见,火灾点上空 Z 的西

边缘几乎是垂直向上伸展的,综合分析章丘和荣成探空数据、雷达的径向速度产品和垂直风廓线产品,这时火灾点上空是偏西风,风速不大,2.2 km 高度风速约为 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,0.9 km 以下为 $2\sim 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。上升气流将燃烧物带到空中,西边缘只有很小的往下风方向倾斜,最大高度上升到 4.3° 仰角,高度约为 3.6 km。较大 Z 值出现在 1.6~2.8 km ($1.5^\circ\sim 3.3^\circ$ 仰角) 高度,最大值出现在 1.6 km,为 36 dBZ。

自下向上的每个仰角平面上, C_e 与 Z 的范围基

本一致(图 5b)。0.5°仰角的 C_e 值存在地物回波的干扰,有一些地方出现较高的 C_e 值;1.5°和 2.4°仰角,边缘位置的 C_e 值也稍高,这是由边缘处信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)较低造成的,其他大部分区域的 C_e 值小于 0.5,这与文献[1]探测的 0.49 的 C_e 平均值接近。

Jones 等^[1]分析一次公寓楼火灾的 Z_{DR} 平均值为 1.7 dB。分析图 5c 可见,从低层到高层仰角,大部分区域 Z_{DR} 值很高,尤其在火灾点的下方,大多数库元的 Z_{DR} 值大于 5 dB,最大值达到 7.8 dB,这个值比文献[1]要高一些,与文献[10]分析的草原火灾的 Z_{DR} 数值类似。

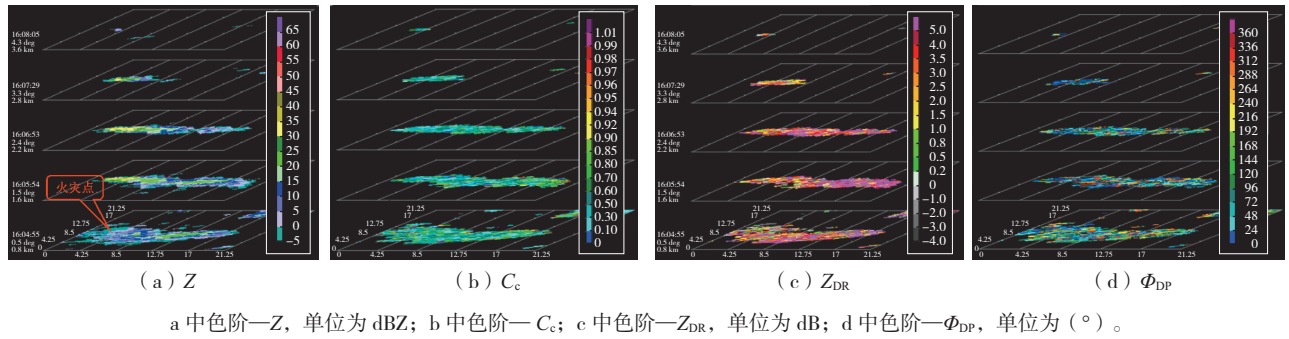


图 5 2020 年 3 月 17 日 16:04 火灾点上空烟台雷达各层仰角平面双偏振参量

Fig.5 Dual-polarization parameters from Yantai radar at each elevation slice over the fire spot at 16:04 BJT 17 March 2020

3.4 烟羽的三维演变特征

为分析燃烧物在空中的扩散状况,图 6 给出了 15:42:00—16:53:54 烟台雷达各层仰角 Z_{DR} 的分布及变化,4 个时次的间隔时间约为 23 min。可以看到,山火刚起不久,15:42:00—15:45:10(图 6a),燃烧的灰烬就上冲到 3.5 km 高度。16:04:55—16:08:05(图 6b),烟尘随风向下游方向扩散,各仰角层上烟尘反射面积达到最大。16:27:51(图

6c)—16:53:54(图 6d),雷达对高空的烟尘逐渐探测不到,而低层能探测到的 Z_{DR} 面积也在逐渐减小,这显示了山火扑灭之后,没有燃烧完的灰烬继续上升,而先前的灰烬逐渐下降的过程。图 6b 上能清晰地看到 Z_{DR} 的大值区,这时探测到的烟尘达到的最高高度为 3.7 km(4.3°仰角)。此后,高仰角的 Z_{DR} 先于低仰角消失,到 16:53:54,仅有 0.5°、1.5°仰角有显示,且覆盖面积也缩小。

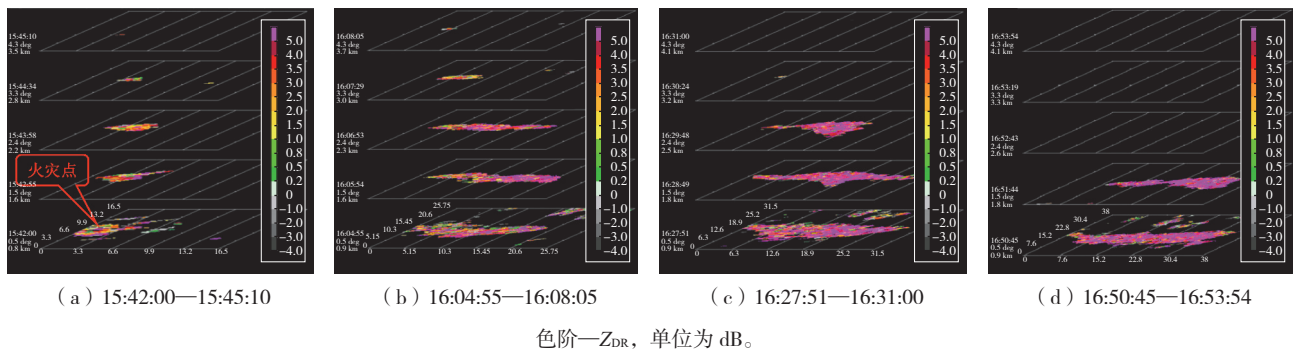


图 6 2020 年 3 月 17 日烟台雷达各层仰角平面 Z_{DR} 变化

Fig.6 Variation of Z_{DR} from Yantai radar at each elevation slice on 17 March 2020

图 7 是 16:04:55—16:25:16 连续 4 体扫时次(每个时次间隔大约 6 min)的 Z_{DR} ,从中可以更细致地看到燃烧物缓慢下沉的过程。与图 7b 比较,图 7a 能探测到 Z_{DR} 的面积只是 3.3°仰角面积增大,其余仰角上变化不大;16:19:32,4.3°仰角(图 7c)上已经探测不到 Z_{DR} ,16:24:40,3.3°仰角(图 7d)上

Z_{DR} 的面积已经减小到即将探测不到,之后,16:25:16,4.3°仰角(图 7d)已完全探测不到 Z_{DR} 。

4 黄岛山火的雷达探测特征

4.1 雷达反射率因子特征

黄岛山火灰烬的上升和移动特征与牟平山火非常

相似,火灾发生后,烟尘很快上升,之后随着环境风向下风方向飘散。图8是2020年4月23日14:13:30—18:41:10青岛双偏振雷达2.4°仰角反射率因子的时间序列。14:13,山火刚发生时,0.8 km高度(2.4°仰角)出现长宽大约各2.5 km范围的烟羽, Z 最大值为16 dBZ,之后烟羽随西偏北风向下游东南方向飘散,面积逐渐

扩大,14:42,长度增长到25 km,宽度为9 km。火灾点上空 Z 增强到36 dBZ。之后,下风方向的 Z 逐渐减小;15:16,火灾点下风方大约8 km、20 km处出现25 dBZ的相对较大值,而其他区域大多小于15 dBZ。17:33之后,火灾点下风方向的 Z 降低到10 dBZ以下,烟羽的面积也逐渐减小。烟羽在空中维持了大约4 h 28 min。

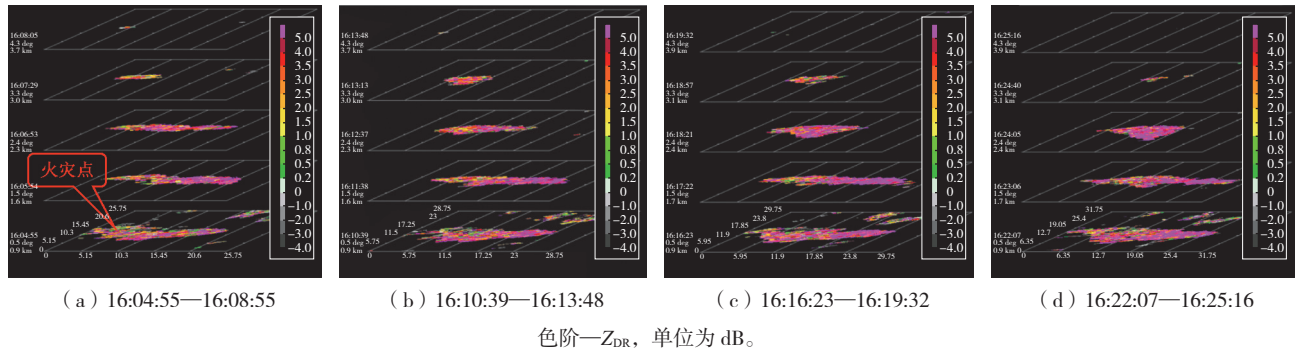


图7 2020年3月17日烟台雷达连续体扫时次各层仰角平面 Z_{DR} 变化

Fig.7 Variation of Z_{DR} from Yantai radar at each elevation slice during continuous volume scanning on 17 March 2020

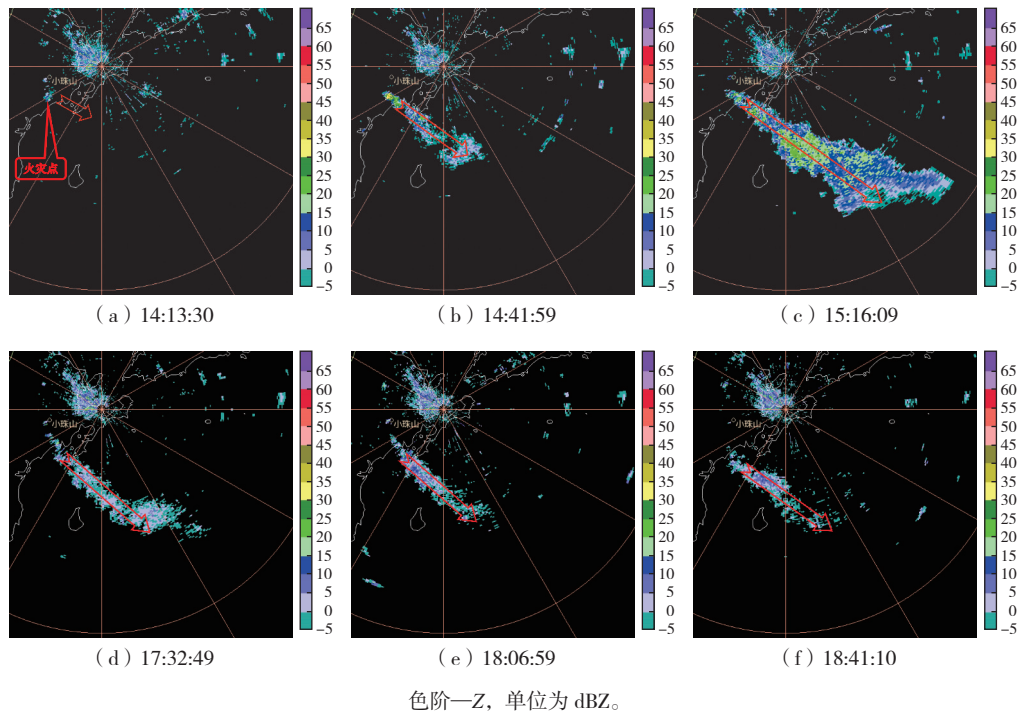


图8 2020年4月23日青岛雷达连续体扫时次2.4°仰角 Z

Fig.8 Z from Qingdao radar at 2.4° elevation during continuous volume scanning on 23 April 2020

4.2 烟尘飘浮物移动的最远距离

图9给出了16:30青岛雷达0.5°仰角 Z 、径向速度(V)、 C_e 、 Z_{DR} 。该时次的烟尘向东南漂移最远,其前沿距火灾点94 km,对应0.5°仰角雷达波束中心高度约1.2 km(图9a)。从14:13发生山火到

16:30共2 h 17 min,由此估算烟尘移动平均速度为 $11.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由图9b可见,径向速度的范围与图9a中 Z 的范围接近,考虑径向速度方向大致接近漂浮物运动方向(环境风方向),并且考虑SNR不能太小(不考虑边缘的径向速度值),定性估测图中蓝色箭

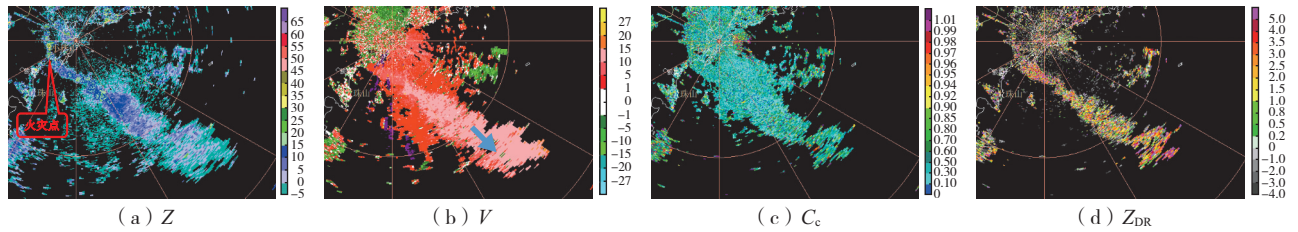
头位置的风速大约为 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,这与将烟尘作为示踪物计算的速度接近。图 9c 和图 9d 分别是 C_e 和 Z_{DR} 参量,因为计算 Z 和 V 时用的 SNR 门限是 3 dB,而计算偏振量时用的 SNR 门限是 5 dB,所以在弱信号区 C_e 和 Z_{DR} 的范围比 Z 的范围小一些。

4.3 烟尘飘浮物达到的最大高度

图 10 是 16:30 青岛雷达多仰角 Z 、 Z_{DR} 。图 10b 中带状 Z_{DR} 大值区的数值超过 5 dB,印证了图 10a 中相应位置的带状反射率是火灾烟尘产生的,这时 Z 的强度大多在 20 dBZ 以下,但高度达到 4.8 km

(6.0° 仰角)。

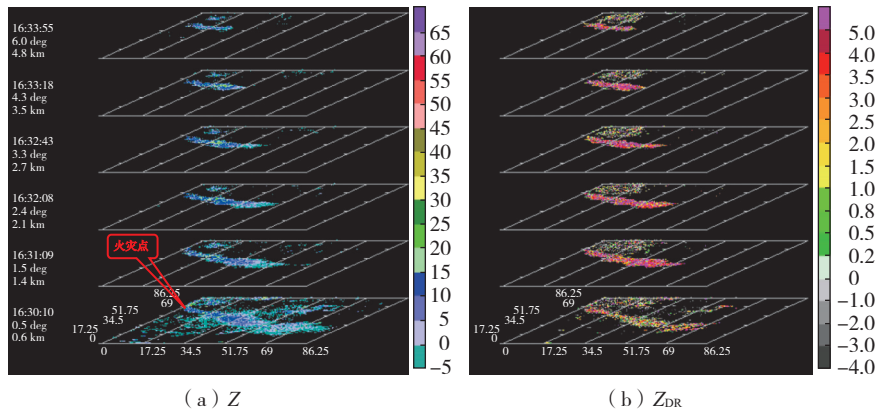
以上分析表明,这两次森林火灾探测到的雷达反射率因子大部分在 20 dBZ 左右,这比文献[10]和[15]探测到的 Z 值高,烟羽飘散的范围也大得多。探测到烟羽的 Z_{DR} 非常高,很大部分区域大于 5 dB,而 C_e 值很低,一些距离库的值低至 0.5 以下,这说明产生回波的反射物主要是水平尺度较大的非球形反射物。这两次森林火灾一次是未熄灭的烟头引燃干草,另一次是违规电焊操作引燃干草、树叶,这些燃烧物可能是造成上述探测结果的原因。



a 中色阶— Z , 单位为 dBZ; b 中色阶— V , 单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; c 中色阶— C_e ; d 中色阶— Z_{DR} , 单位为 dB。

图 9 2020 年 4 月 23 日 16:30 青岛雷达 0.5° 仰角双偏振参量

Fig.9 Dual-polarization parameters from Qingdao radar at 0.5° elevation at 16:30 BJT 23 April 2020



a 中色阶— Z , 单位为 dBZ; b 中色阶— Z_{DR} , 单位为 dB。

图 10 2020 年 4 月 23 日 16:30 青岛雷达各层仰角平面双偏振参量

Fig.10 Dual-polarization parameters from Qingdao radar at each elevation slice at 16:30 BJT 23 April 2020

5 结论

(1)两次森林火灾燃烧产生的灰烬上升到高空并向下游飘散,雷达探测到的反射率因子(Z)多在 20 dBZ 左右,在火灾点上空有很小区域的最大值达到 36 dBZ。根据烟台、青岛双偏振雷达探测分析,牟平山火的烟尘向下游扩散最远距离为 65 km,最高上升到 3.7 km;黄岛山火的烟尘向下游扩散最远距离为 94 km,最高上升到 4.8 km。将烟羽的前沿

看作示踪物,可估算出牟平山火 2.2 km 高度的偏西风风速约为 $8.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,估算黄岛山火 1.2 km 高度西北风风速约 $11.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。两次火灾都发生在晴天,环境风速不大,除了烟羽边缘位置速度谱宽值较大,其他地方都很小,大部分在 $1\sim 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(2) C_e 与 Z 的分布形态和面积非常接近,同样随烟羽的扩散而逐渐增大。 C_e 值非常小,大多数区域小于 0.9,少数距离库的 C_e 值低于 0.5,这比文献[1]探测到的 C_e 值低很多。火灾点上空 Z_{DR} 值相对

较小,为2~3 dB,火灾点下风方大部分区域的 Z_{DR} 值都很大,大多超过5 dB。分析原因在于,山火旺盛阶段,火灾点上空上升气流强盛,将灰烬带到空中,加之温度偏高,环境大气的湍流加强,使得燃烧物排列无序,因此出现小范围 Z_{DR} 较小值,为1~3 dB;下风方向的气流相对平稳,灰烬逐渐下沉,而水平尺度较大的灰烬下沉速度慢,因此 Z_{DR} 出现高值。 Φ_{DP} 的数值变化很大,分布杂乱无章,类似噪声分布。

(3)文献[1]认为在山火形成的上升气柱边缘由于环境大气的夹卷形成湍流,而尺度与雷达半波长(5 cm)相当的湍流会产生布拉格散射,但布拉格散射的 C_e 值接近1, Z_{DR} 值接近0 dB。文中分析的两次山火的 C_e 和 Z_{DR} 数值, C_e 更小,而 Z_{DR} 出现大值,由此可推测S波段双偏振雷达探测到的反射物主要是由大火带到空中的干草、树叶之类的灰烬。双偏振天气雷达探测森林山火具有很低的 C_e 值、很高的 Z_{DR} 值,这一显著的特征使其在监测分析森林火灾方面具有独特的优势,尤其在阴天或者能见度低的天气条件下,卫星遥感和视频等探测设备无法进行有效探测时,双偏振雷达的这种探测特征更能发挥其重要作用。

参考文献:

- [1] JONES T A, CHRISTOPHER S A, PETERSEN W. Dual-polarization radar characteristics of an apartment fire[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2009, 26(10): 2257-2269.
- [2] 武晋雯,冯锐,孙龙彧,等.基于Himawari-8和GF-1卫星的林火遥感监测[J].*灾害学*, 2018, 33(4): 53-59.
- [3] KIEFER C M, CLEMENTS C B, POTTER B E. Application of a mini unmanned aircraft system for in situ monitoring of fire plume thermodynamic properties [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2012, 29(3): 309-315.
- [4] 徐八林,杨卫洁,徐舒扬,等.C波段高山天气雷达对森林火灾的探测能力初析[J].*气象*, 2020, 46(8): 1113-1121.
- [5] 陈唯实,黄毅峰,卢贤锋,等.基于气象雷达的鸟类迁徙监视预警[J].*中国民用航空*, 2020(7): 48-51.
- [6] 姚文,张晶,余清波,等.辽河三角洲湿地鸟类活动的双偏振天气雷达回波特征[J].*气象*, 2022, 48(9): 1162-1170.
- [7] BANTA R M, OLIVIER L D, HOLLOWAY E T, et al. Smoke-column observations from two forest fires using Doppler lidar and Doppler radar [J]. *J Appl Meteor*, 1992, 31(11): 1328-1349.
- [8] ROGERS R R, BROWN W O J. Radar observations of a major industrial fire [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1997, 78(5): 803-814.
- [9] ERKELENS J S, VENEMA V K C, RUSSCHENBERG H W J, et al. Coherent scattering of microwaves by particles: evidence from clouds and smoke [J]. *J Atmos Sci*, 2001, 58(9): 1091-1102.
- [10] MELNIKOV V M, ZRNIC D S, RABIN R M, et al. Radar polarimetric signatures of fire Plumes in Oklahoma [J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35(14): L14815.
- [11] ROTHERMEL R C. Predicting behavior and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains [R]. Ogden, UT, USA: Intermountain Research Station of USDA Forest Service, 1991: 1-46.
- [12] JONES T A, CHRISTOPHER S A. Satellite and radar remote sensing of southern Plains grass fires: a case study [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2010, 49(10): 2133-2146.
- [13] 陈永林,曹晓岗,邵玲玲,等.上海一次重大火灾烟雾的雷达回波特征研究[J].*气象科学*, 2010, 30(1): 121-125.
- [14] 黄克慧,周功铤,谢海华,等.森林火灾的CINRAD/SA雷达监测[J].*气象科学*, 2007, 27(增刊1): 99-106.
- [15] 张深寿,魏鸣,赖巧珍.两次火情的新一代天气雷达回波特征分析[J].*气象科学*, 2017, 37(3): 359-367.
- [16] 黄克慧,朱景,黄以平,等.基于多普勒天气雷达的火情自动识别系统[J].*气象*, 2013, 39(2): 241-248.
- [17] 罗辉,张杰,朱克云,等.基于风暴识别算法的森林火灾识别[J].*火灾科学*, 2014, 23(4): 218-224.
- [18] 徐舒扬,吴翀,刘黎平.双偏振雷达水凝物相态识别算法的参数改进[J].*应用气象学报*, 2020, 31(3): 350-360.
- [19] 冯亮,肖辉,孙跃.X波段双偏振雷达水凝物粒子相态识别应用研究[J].*气候与环境研究*, 2018, 23(3): 366-386.
- [20] 郭凤霞,马学谦,王涛,等.基于X波段双偏振天气雷达的雷暴云粒子识别[J].*气象学报*, 2014, 72(6): 1231-1244.