

郑钟尧,魏鸣,王彦,等. 一次爆炸事件的天气雷达散射机理和回波特征分析[J]. 陕西气象,2022(1):66-71.

文章编号:1006-4354(2022)01-0066-06

一次爆炸事件的天气雷达散射机理和回波特征分析

郑钟尧¹,魏 鸣²,王 彦³,傅 超¹

(1. 沧州市气象局,河北沧州 061001;

2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044;

3. 天津市气象局,天津 300000)

摘要:天气雷达主要用于探测降水的演变过程,但它也可监测爆炸事件的回波。为研究多普勒天气雷达探测爆炸燃烧事件的回波特征和散射机理,利用位于天津滨海新区西南部的沧州多普勒天气雷达,对2015年8月12日23:30左右天津塘沽发生的重大爆炸事故进行分析研究。结果发现:在爆炸前期和后期,回波的形成机理分别为粒子散射和湍流衍射;爆炸具有区别于气象回波的孤立回波特征,回波呈水平尺度较小、突然出现且强度较大的特点;回波的生消演变与爆炸情况相吻合,在反射率因子垂直剖面图上有蘑菇云特征。多普勒天气雷达的回波资料可以作为一种补充资料,为爆炸燃烧后的灾情监测和灾后调查提供参考依据。

关键词:多普勒天气雷达;爆炸燃烧;回波特征;湍流衍射

中图分类号:P412.25

文献标识码:A

多普勒天气雷达是监测暴雨、飑线、台风、冰雹等灾害性天气过程的重要探测手段,业务上主要将其应用于对以上灾害性天气的监测和预警,并用于定量估测大范围降水、获取大气风场的信息以及数值预报模式资料同化的研究^[1-2]。天气雷达虽然主要用于降水天气的监测,但也具有探测非降水回波的能力,例如在探测火情方面有爆炸回波和火情回波,可以提供动态演变信息,为灾后调查提供数据支持。

当前针对火情的卫星监测研究较多,例如用NOAA/MODIS/FY等极轨卫星数据进行监测,具有覆盖范围广、时间分辨率高的优势^[3]。有学者对几种卫星系统监测技术进行对比,认为EOS/MODIS卫星系统对林火、沙尘等自然灾害中的监测效果较好,监测精度和准确度较高^[4-5]。王钊等利用MODIS系统监测的地表热点数据,得到2001—2009年陕西省地表热异常点的时空

分布规律^[6]。但卫星监测空间分辨率较低,受天气状况影响较大,对着火时长、实际着火面积、火灾次数等指标的确定存在较大误差^[7]。

雷达对于在有效范围内的单一或多个火点监测效果较好,可以作为监测火情的有效补充手段,国内已经有学者针对火情产生的雷达回波及散射机理做了一些分析。陈永林等^[8]对2006年5月4日上海一次重大火灾所产生的雷达回波进行分析,证明新一代天气雷达处于降水模式下可以探测到火灾烟团,并且雷达回波的发展与火灾的生消一致;黄克慧等^[9]对2007年发生在浙江省的10次不同规模的森林火灾进行分析,发现火情产生的回波具有回波顶高度低、出现速度辐散对、回波强度有变化的特点。福建省自2011年起在龙岩开启了新一代天气雷达自动监测和森林火灾预警技术研究及业务应用,经过几年的不断开发和改进,天气雷达已成为福建地区监测、扑救森林火

收稿日期:2021-03-13

作者简介:郑钟尧(1995—),女,河北沧州人,本科,助工,主要从事天气雷达维护与保障工作。

基金项目:国家自然科学基金项目(41675029)

灾的有效手段。张深寿等^[10]认为在持续燃烧的晴空大气中,温度、气压和湿度变化剧烈,这种不均匀性产生了涡旋湍流,这是以高频扰动涡旋为特征的有旋的三维运动,对大量的个例进行分析,得出林火判别的主要指标,并提出了对林火的人工监测流程。黄琴等^[11]结合探空资料分析了大气温、压、湿梯度造成折射指数分布不均以及背景风场引起的晴空回波,其散射机理与爆炸后期的散射机理相似。王威等^[12]对岳阳市发生森林火灾时的回波进行分析,同样也验证了多普勒天气雷达监测火情的效果好。福建省气象局将天气雷达应用于监测突发爆炸事件,2015年4月6日晚福建省漳州市一家PX项目工厂发生爆炸,利用回波图上的强度和速度特征,可以清晰地识别其中较大规模爆炸的结构演变。

由于爆炸本身属于小概率突发事件,与此相关的深入机理研究和回波特征分析仍较少。本文为研究天气雷达在探测爆炸燃烧事件中的回波特征和散射机理,以2015年8月12日23:30左右天津塘沽的重大爆炸事故为例,分析多普勒天气雷达回波特征的演变,旨在揭示爆炸回波的形成机理,为业务应用提供更多的参考依据。

1 事件简介

2015年8月12日23:30左右,天津市塘沽区一仓库发生重大火灾爆炸事故,事故造成165人遇难,8人失踪,798人受伤^[13]。距离最近的塘沽天气雷达因爆炸受损停机,距离事故地点较近的多种雷达设备则迅速投入到监测任务中,其中距离事故发生地118 km的河北沧州多普勒天气雷达观测到了事故的爆炸回波演变。不过爆炸发生后近10个小时的大火燃烧没有被沧州雷达探测到,分析认为后续燃烧的湍流衍射能量弱,加上受距离、高度和雷达探测灵敏度所限,所以难以被雷达探测到。

位于河北省沧州市的多普勒天气雷达属于CINRAD/SA型新一代天气雷达,被置于VCP21降水模式下运行,由于事发时8月属于汛期,按照业务要求,沧州雷达全天候运行不停机,全程监测到了此次爆炸。沧州雷达距离塘沽雷达约110 km,位置接近塘沽雷达的西南方,是距离事

发地最近的一部雷达。

2 天气雷达探测爆炸回波的原理

天气雷达主要以探测降水回波为主,当雷达波束在大气中传播,遇到云滴、雨滴及冰晶等颗粒物会造成后向散射,随粒子的相态和几何形状不同而有差异,通过分析雷达回波可以得到粒子的空间位置、强弱分布、移动速度以及相态类别等特征。大气的动力、热力和水汽分布不均匀产生的湍流团,雷达探测到这些湍流团在一定条件下通过湍流衍射可产生非降水回波。

爆炸和火灾发生时,现场可被电磁极化的物质对雷达电磁波产生散射,爆炸后空气湍流团的温度、气压和湿度的强烈变化使大气折射率的梯度增大,雷达可接收到回波信号。根据爆炸事件的演变,从爆炸初始阶段到后期的浓烟阶段,雷达回波具有不同的特征及形成机制,下面分别进行讨论。

2.1 爆炸初始阶段的回波形成机制

开始爆炸时,现场的库房、储物罐及各种碎片中含有金属导电介质的物质,由于爆炸产生的巨大冲击力会散布到空中,对雷达电磁波产生了散射,回波强度超过35 dBz,最强回波达到50~55 dBz。瑞利散射条件下,目标物对电磁波的雷达截面 σ (又称后向散射截面)公式^{[14]9-10}为

$$\sigma = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} \left[\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right]^2 \quad (1)$$

其中, D 为目标物(如爆炸后的碎屑)的直径(单位:mm), λ 为雷达波长(单位:cm),当目标物的粒子直径远小于波长时(即满足瑞利散射)时可以通过(1)式计算其后向散射截面。大气折射指数 n 与散射目标的相对介电常数 ϵ 的关系^{[14]91-93}为

$$n = \sqrt{\epsilon} \quad (2)$$

散射目标的爆炸之初回波的形成机制:雷达电磁波探测到具有相对介电常数 ϵ 的爆炸碎屑时发生散射,即入射电磁波在介质内部传播时产生极化,其后向散射能量被雷达接收。此阶段雷达回波的形成机制符合粒子散射的规律,这些导电介质对于电磁波的散射比同体积降水粒子的散射能量强,所以回波较强。

2.2 爆炸发生后期的回波形成机制

当爆炸发生一段时间后,空气中存在持续燃烧的浓烟,此时仍有雷达回波存在,但回波强度明显弱于爆炸初始阶段,这时的回波形成机制有两类:(1)爆炸后烟云中悬浮的颗粒物如果可以被电磁波极化,仍会引起粒子散射;(2)当这些爆炸碎屑已经沉降到地面后,后期持续的弱回波是大气温度、气压和湿度的强不均匀引起的晴空湍流团对电磁波的湍流衍射,其回波形成机理如下^{[14]30-32}。

湍流大气的回波遵从 Bragg 定律,回波反射率 η (单位: mm^2) 为

$$\eta = 0.39 C_n^2 \lambda^{-1/3} \quad (3)$$

其中 λ 是雷达波长(单位: cm); C_n 是大气折射率的结构常数。分析上式可看出,湍流大气对雷达电磁波的反射率 η 正比于大气折射率结构常数 C_n ,且与雷达波长 λ 的 $-1/3$ 次幂成正比。使用量纲分析,并从大气流体运动方程出发,得出结构常数 C_n 的关系式为

$$C_n = a^2 L_0^{4/3} M^2 \quad (4)$$

式中 L_0 是湍流外尺度(单位: km); M 是水平折射率的垂直梯度(单位: m^{-1}); a 是无量纲常数。

水平折射率的垂直梯度用 M 表示为

$$M = \frac{dn}{dh} \quad (5)$$

当电磁波在大气中传播时,大气折射指数 n 与温度、气压和湿度各要素之间的关系式为

$$N = (n-1)10^6 = \frac{77.6}{T} \left(P + \frac{4810e}{T} \right) \quad (6)$$

其中, $N = (n-1)10^6$ 是大气折射指数的实际应用单位,表示折射指数的变化,简称折射指数 N 单位; T 是大气温度(单位: K); P 是气压(单位: hPa); e 是水汽压(单位: hPa)。分析(6)式可知, n 与 P 和 e 成正比,与 T 成反比。

湍流大气对雷达电磁波衍射的物理实质是:不同尺度的湍块相当于具有不同间距的空间衍射光栅,而不同间距的衍射光栅对于不同散射角上的散射能量有明显的贡献,也即恰巧可以在该方向上形成衍射的“亮点”。根据光学中 Bragg 定律,当雷达发射电磁波并接收目标物的后向散射

时,能在后向方向上产生衍射“亮点”的有效湍流团尺度 d ^[15](单位: cm) 为

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (7)$$

即只有湍流团尺度等于半个波长的衍射能量才能够被雷达探测到。沧州 S 波段多普勒天气雷达的波长是 10.7 cm ,可探测到尺度大约为 5.35 cm 的燃烧湍流团。因此,爆炸后期持续燃烧的阶段,大气存在着温度、气压和湿度各要素的剧烈变化,产生的湍流团使大气折射率及大气结构常数分布不均,从而产生湍流大气的衍射回波,此阶段回波形成机制不同于粒子散射,回波强度相对较弱。分析公式(3)~(7)可知,不同于粒子散射的强弱主要与粒子尺度有关,湍流团衍射的强弱主要是与水平折射率 n 的垂直梯度 M 有关,且存在符合雷达半波长的湍流团。

3 爆炸回波特征

沧州雷达海拔高度为 0.112 km ,距离事发地约 110 km ,根据雷达测高公式计算可得,雷达在 0.5° 、 1.5° 、 2.4° 、 3.4° 仰角上的最低可探测高度分别为 1.78 km 、 3.7 km 、 5.43 km 、 7.35 km 。在事故初始阶段,爆炸产生的热对流足够高,这四个仰角的 PPI 图上均体现有爆炸特征的回波。

图 1 是沧州多普勒天气雷达探测到的塘沽爆炸回波。爆炸发生于 12 日 23:34,爆炸前事故发生地处于起火状态(图 1 圈出位置为事故发生地,距离沧州雷达 118 km ,方位角 44°)。从 12 日 23:36 时次 0.5° 仰角的强度图上可以看到事故地点突然出现的强回波,强度可达 50 dBz ,且水平尺度非常小,前一时次该位置还没有任何异常回波。这一点与气象回波有所区分,气象产生的强回波即使尺度较小,但一般在时序图上能观察到强度由弱变强的过程。此后时次这个位置附近的回波强度逐渐变弱,强回波向偏东方向移动,到 00:36 时,即事故发生后一个小时,回波强度最高为 30 dBz ,回波面积变大。说明随着时间推移,爆炸产生的火情影响范围在扩大,并且受冲击波和风向共同影响向东南方扩散。13 日凌晨 01:36 回波基本消失,回波持续了 2 h 。低层 $5 \sim 10 \text{ dBz}$ 的弱回波是环境背景的晴空湍流回波。

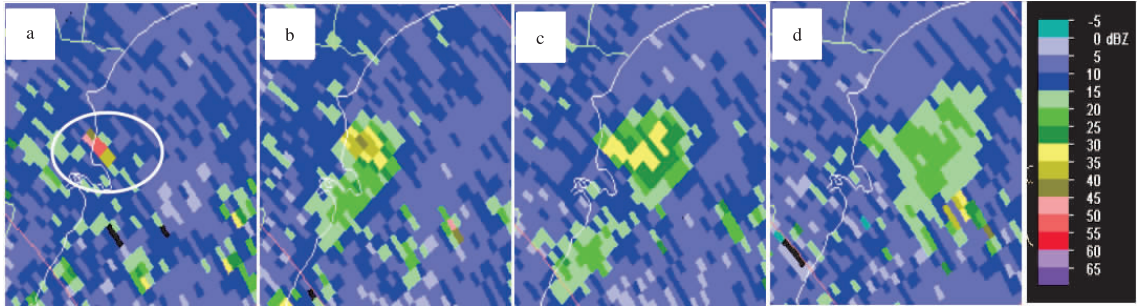


图1 2015-08-12 0.5°仰角沧州多普勒天气雷达回波图(圈出位置为事故发生地)

(a. 12日 23:36; b. 13日 00:06; c. 13日 00:36; d. 13日 01:06)

图2是23:36和23:42两个时次仰角分别为0.5°、1.5°、2.4°、3.4°的回波强度图。23:36时次的0.5°仰角回波强度最强(达到50 dBZ),2.4°仰角时雷达可探测到的高度为5.9 km,回波强度为35 dBZ。由于这个高度上已经没有背景场的晴空湍流弱回波,周围没有其他杂波干扰,抬高雷达仰角时爆炸的孤立回波很明显。23:42时0.5°仰角

回波为40 dBZ,范围较之前增大,抬高仰角到3.4°时这两个时次的回波仍清晰可见,也可说明爆炸回波的高度足够高。观察之后的时次,高层2.4°仰角的回波直到持续到13日00时才逐渐消失。此阶段为爆炸现场空中物质中的导电介质对雷达电磁波的强散射,属于粒子散射,回波强度较强,稳定少动。

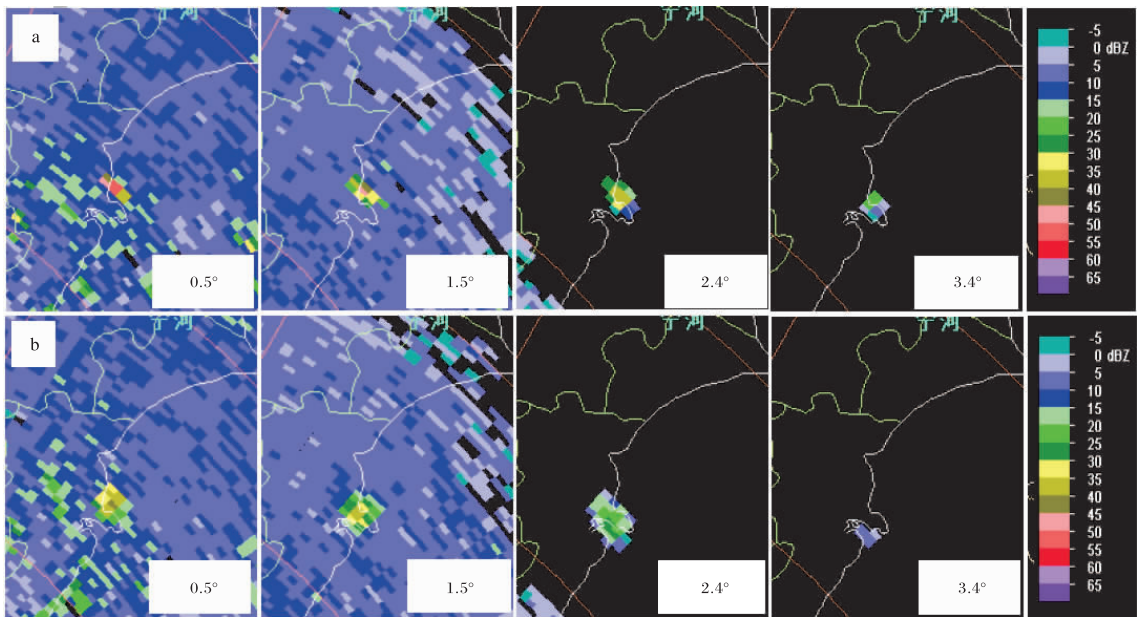


图2 2015-08-12T23:36(a)和T23:48(b)爆炸回波多仰角图

爆炸回波在径向速度和谱宽图上也有明显特征,图3选取了爆炸初始阶段23:36和23:48的径向速度(0.5°)和谱宽(1.5°)。速度图上初始时刻23:36爆炸区域特征不太明显,但后续时刻暖色调速度区面积不断增大。虽然径向速度值较小但仍然可以区分出来,呈辐散特征(图3中用蓝色圆圈标出)。谱宽反映采样体积内粒子的多普勒

速度偏离整体平均值的平均程度,可提供由于风切变、湍流和采样体积内平均径向速度方差的观测^[16]。23:36,0.5°仰角爆炸地点谱宽值不明显,观察时易被忽略,而同时刻1.5°仰角谱宽值达到12 m/s,较周围强烈,谱宽是采样体积中的速度脉动,爆炸对周围大气产生了热力梯度和气压梯度,产生了12 m/s的少见大谱宽值,可以

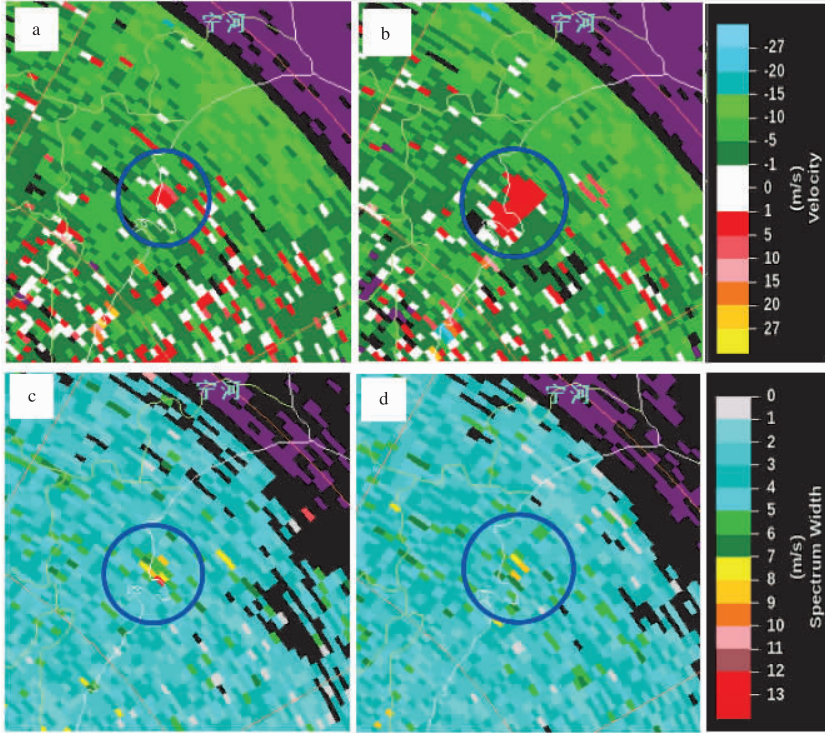


图3 2015-08-12 0.5°仰角径向速度图(a. 23:36;b. 23:48)和 1.5°仰角谱宽图(c. 23:36;d.23:48)(蓝色圆圈中为事故发生地)

反映出爆炸气流后大气中的剧烈扰动。下面对比同时刻的速度和谱宽图,以分析爆炸后大气气流结构的演变。

为了看到爆炸后大气垂直方向上的回波特征,对 23:36 和 23:42 两个时次做了反射率因子剖面图(图 4)。图 4 中红色箭头方向代表剖面线位

置,可以看出,23:36 45 dBz 的强回波接近 3 km 高度,此时处于爆炸初始阶段,爆炸发生时在极短时间内爆发出巨大能量,垂直剖面图上有典型蘑菇云状热对流柱特征。6 min 之后的 23:42 回波强度迅速减弱且高度降低,此时已经过渡到大气湍流团的湍流衍射。

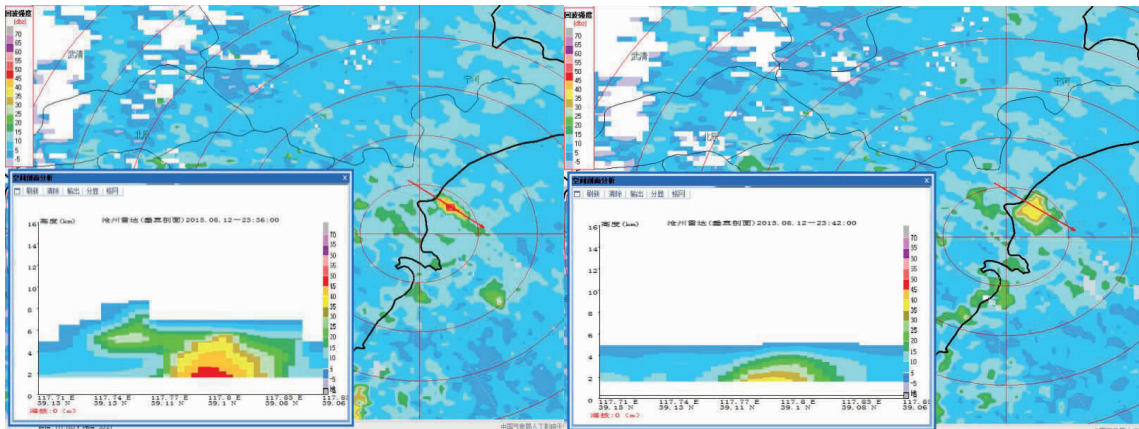


图4 2015-08-12T23:36(图 a)和 T23:42(图 b)反射率因子的 PPI 和 RCS(直线代表剖面线位置)

综合以上资料分析,回波的生消演变与爆炸的过程及特征相符。由时间、地点、强度和速度特

征的吻合可以推断雷达回波的确反映了爆炸的真实情况,回波资料可信。由于爆炸大多是一瞬间

的事故,通过雷达回波能够分析爆炸发生的次数、强弱以及影响范围等信息,可以作为一种辅助手段为灾后的调查研究提供数据支持。

4 结果与讨论

(1)此次爆炸回波的特征可以概括为以下几点。①爆炸发生后的短时间内雷达回波强度突然增强,最强达到 50 dBz。爆炸区域呈正的径向速度,随后附近西南方向出现了另一个正速度区,呈辐散特征。②爆炸产生的回波有别于气象回波,呈现水平尺度小、突然出现且强度较大的特点。结合速度和谱宽图也能观察到相应地点有回波像素变化。③将雷达的强度、速度、谱宽以及垂直结构图与爆炸过程相比较,可以看出雷达回波的孤立回波特征与爆炸过程相一致。④对爆炸区域的反射率因子做垂直剖面图 RCS 能看到回波高度和强度突增,有热对流柱特点,符合爆炸的蘑菇云特征。用回波分析爆炸有较强的可信度。

(2)通过爆炸事件的回波演变,研究了爆炸燃烧不同阶段的散射机制。爆炸发生前期回波的主要形成机制是导电介质粒子对电磁波的散射,此阶段回波会突然加强;爆炸发生后期回波的形成机制有两类,一类仍有空中颗粒物的粒子散射,另一类是由于大气温度、气压、湿度的剧烈变化而产生的湍流衍射,此阶段的回波强度明显弱于前期,识别时可以配合回波强度、径向速度和谱宽分析。

(3)由于爆炸点范围相对于多普勒天气雷达整个探测范围较小,且强回波持续时间较短,在识别时容易将其与常规降水回波或普通杂波混淆。针对不同地点,雷达所能探测到的烟团高度不同,距离越远,雷达探测能力越弱,具体应用时还需结合当地实际情况来分析判断。

参考文献:

- [1] 李柏,古庆同,李瑞义,等. 新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及其未来发展[J]. 气象,2013,39(3):265-280.
- [2] 黄勤,龙亚星,任芳. 陕西新一代天气雷达数据质量控制[J]. 陕西气象,2016(1):43-47.
- [3] 闫德民,李庆阁. 我国森林火灾监测体系现状及展望[J]. 森林防火,2017(3):27-30.
- [4] 舒立福,王明玉,赵凤君,等. 几种卫星系统监测林火技术的比较和应用[J]. 世界林业研究,2005,18(06):49-53.
- [5] 张树誉. EOS/MODIS资料在陕西自然灾害监测中的应用[J]. 陕西气象,2003(5):33-35.
- [6] 王钊,赵青兰,王卫东. MODIS卫星监测陕西地表热异常点时空分布规律[J]. 陕西气象,2011(2):39-41.
- [7] 伊坤朋,包玉龙. 遥感技术在火监测中的应用研究综述[J]. 世界林业研究,2016(04):36-41.
- [8] 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.
- [9] 黄克慧,周功铤,谢海华,等. 森林火灾的 CIN-RAD/SA 雷达监测[J]. 气象科学,2007,27(S1)99-105.
- [10] 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.
- [11] 黄琴,魏鸣,胡汉峰,等. 晴空回波的大气风温湿结构及双偏振雷达参量分析[J]. 气象,2018,44(4):526-537.
- [12] 王威,林南,徐高琪,等. 基于岳阳雷达的火情回波特征分析[J]. 低碳世界,2019(2):288-289.
- [13] 新华社. 天津港“8·12”瑞海公司危险品仓库特别重大火灾爆炸事故调查报告公布[EB/OL]. (2016-02-05)[2020-09-20]. http://www.xinhuanet.com/politics/2016-02/05/c_1118005206.htm.
- [14] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学[M]. 2版. 北京:气象出版社,2001.
- [15] 唐云志. 晴空回波的散射机理与回波分析[D]. 南京:南京信息工程大学,2014.
- [16] 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,2006:183-187.