

基于雷达的多源信息森林火灾监测模型应用研究

王威¹ 何筱仙¹ 张深寿²

(1 湖南省岳阳市气象局, 岳阳 414000; 2 福建省龙岩市气象局, 龙岩 364000)

摘要: 为实现对森林火灾的及时扑救, 提高森林火灾监测效率, 利用雷达数据, 结合气象传感器获取的温度、降水、相对湿度、风速等信息, 通过信息层、特征层、决策层的数据处理, 建立了基于雷达的多源信息森林火灾监测模型, 并利用模型对2015—2017年岳阳市森林火灾实例资料进行分析, 得出基于雷达的森林火灾发生概率等级多源信息融合值。利用模型对岳阳市2018年雷达监测范围内的火情进行实时监测, 结果表明, 该模型能够较准确的监测森林火灾, 火情命中率可以达到83%。

关键词: 森林火灾, 多源信息融合, 雷达, 气象

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.018

Study on Multi-source Information Forest Fire Monitoring Model Based on Radar

Wang Wei¹, He Xiaoxian¹, Zhang Shenshou²

(1 Yueyang Meteorological Bureau, Yueyang 414000 2 Longyan Meteorological Bureau, Longyan 364000)

Abstract: In order to timely put out forest fires and improve the efficiency of forest fire monitoring, by using radar data, meteorological sensors of temperature, precipitation, relative humidity, wind speed and other information, through information layer, feature layers and data processing from decision makers, radar source information model of forest fire monitoring was developed. We used the model to investigate forest fires instance data from 2015 to 2017 in Yueyang. Results show forest fire probability based on radar level values of multi-source information fusion. The model was used for real-time monitoring of fires within the radar monitoring range of Yueyang in 2018. The model was found to efficiently monitor forest fires and the fire hit rate reached 83%.

Keywords: forest fire, multi-source information fusion, radar, meteorology

0 引言

及早发现森林火灾, 并组织人力合理扑救, 能极大减少森林损失。目前监测森林火情的手段有卫星、雷达、人工瞭望、飞行巡航等^[1-2], 相较于人工瞭望和飞机巡航, 雷达具有覆盖面广、耗费少的优点, 相较于卫星监测, 雷达具有高时间、高空间分辨率的优点^[3]。但雷达在监测火情时易受弱降水、地物等影响, 监测准确率还有待提高^[4]。

近年来, 研究者发现利用多源信息融合技术监测火灾能提高火灾监测准确率。余福波等^[1]将自适应加权数据融合算法和D-S证据理论应用于智能火灾预警预报系统中, 有效提高了系统对火灾的识别能力。朱泽明^[2]将BP-RBF多源信息融合算法应用于森林火灾报警系统中, 提高了整个森林火灾报警系统的可靠性。

为实现对森林火灾监测快速、准确、便捷的目标, 本文提出基于雷达的多源信息融合技术, 并就该技术应用效果进行检验。该技术能实现对森林火灾快速识别, 有助于及早掌握火情、扑灭火灾, 潜在的社会、经济效益不可估量。

1 资料选取

森林火灾的产生需要同时具备三个条件, 即可燃物、林火环境和火源。林火环境包括天气、林地、小气候和氧气条件等, 其中天气条件是引发森林火灾、影响林火的重要因子^[5-7]。研究^[8-9]发现, 森林火灾的发生与最高气温、最大风速值、最小相对湿度值、未降水天数四个气象要素值关系最为密切。因此, 本文选取温度传感器、湿度传感器、雨量传感器、风速传感器, 结合雷达探测系统进行多源信息融合。

本研究通过实地调查访问获取岳阳市2015—2017年121起森林火灾发生的时间、地点、持续时间等基础资料。

收稿日期: 2019年6月21日; 修回日期: 2019年11月18日
第一作者: 王威(1988—), Email: 657484303@qq.com

2 火灾气象条件分析

气象条件是决定森林火灾发生与否的重要因素，其中以气温、相对湿度和降水因子最为密切。为了提高多源信息融合火灾监测模型准确性和实用性，需要对火灾发生时的条件进行分析，以达到简化模型的目的。为此笔者分析了岳阳市2015—2017年121起森林火灾发生时的气温、相对湿度、和降水气象条件和雷达回波特征，并得到表1~表5。

表1 森林火灾日最高气温与火灾发生次数统计表

Table 1 Statistical of daily maximum temperature and occurrence frequency of forest fire

日最高温度值/°C	<10	[10, 15)	[15, 20)	[20, 25)	[25, 30)	[30, 35]
火灾发生次数	4	7	34	70	4	2

由表1可知，当最高气温<25 °C时，森林火灾发生概率随着温度的升高而增加，当25 °C≤最高温度<35 °C时，火灾发生概率随着温度的升高而减小。这主要是因为岳阳地处亚热带季风气候区，雨热同期，到了夏季气温升高的同时，降水集中期来临，不易产生森林火灾。

表2 森林火灾日相对湿度与火灾发生次数统计表

Table 2 Statistical of daily relative humidity and occurrence frequency of forest fires

相对湿度/%	<20	[20, 30)	[30, 40)	[40, 50)	[50, 60)	[60, 70)	[70, 80)	[80, 90)
火灾次数	19	67	26	2	3	1	0	3

由表2可知，森林火灾发生概率与日相对湿度呈负相关，即日相对湿度越高森林火灾发生概率越低。由于岳阳市出现相对湿度<20%的天气占比少，导致该区间段森林火灾发生次数较20%≤相对湿度<30%的区间段发生次数偏少。

表3 森林火灾日最大风速与火灾发生次数统计表

Table 3 Statistical of maximum daily wind speed and occurrence frequency of forest fires

风速/(m/s)	1.6~3.3	3.4~5.4	5.5~7.9
火灾次数	11	49	61

由表3可知，森林火灾发生概率与日最大风速呈正相关，即日最大风速越大森林火灾发生概率越高，这主要是因为较大的风力能使森林火灾得到蔓延扩大。

表4 森林火灾日连续未降水天数与火灾发生次数统计表

Table 4 Statistical of fire days without precipitation and occurrence frequency of forest fires

连续未降水天数/d	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
火灾次数	4	4	8	6	5	23	28	31	3	5	4

由表4可知，当日连续未降水天数<8 d时，森

林火灾发生概率与日连续未降水天数呈正相关。未降水天数越长，空气越干燥，植物和土壤含水量越低，森林火灾越易发。

表5 森林火灾雷达回波与火灾发生次数统计表

Table 5 Statistical of forest fire radar echo and fire occurrence frequency

雷达回波/dBZ	≤5	(5, 15]	(15, 30]	(30, 45]
火灾次数	1	6	44	6

岳阳雷达在非汛期（10月至次年3月）非全天运行，导致森林火灾发生时没有对应的雷达资料，在2015—2017年的121次森林火灾有57次林火被雷达监测到，本文仅对这57次林火回波进行分析（表5），发现森林火灾的发生概率与雷达回波反射率呈正相关，雷达回波反射率≤30 dBZ时，森林火灾发生概率随着回波反射率的增加而增加，当反射率>30 dBZ时，火灾发生概率反而减小。

3 多源信息融合过程

通过分析发现，森林火灾的发生与温度、相对湿度、雨量、风速、雷达回波具有一定的相关性。为进一步提高森林火灾辨识准确率和效率，本文引用多源信息融合系统。系统采用三层次融合结构，即数据层、特征层、决策层。数据层融合过程是对采集的火灾现场气象要素进行预处理的过程；特征层融合通过对不同传感器数据的分析，提取多传感器数据中与森林火灾发生相关的特征，该层次融合是对数据去冗余的过程，能有效剔除环境中的干扰信号^[10]；决策层融合采用合适的融合算法对数据进行再次融合，发挥传感器的联合作用，提高系统的可靠性。它的虚拟处理流程如图1所示。

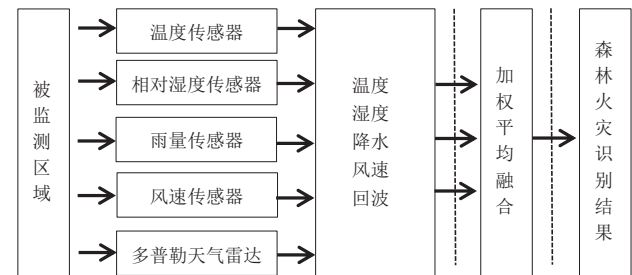


图1 基于雷达的多源信息森林火灾模型框架设计

Fig. 1 Framework design of multi-source information forest fire detection system based on radar

3.1 多源信息数据层融合

基于雷达的多源信息森林火灾探测系统信息层包括温度、相对湿度、降水、风速、雷达反射率等信息。火灾点温度、相对湿度、降水、风速传感器数据通过相邻观测点的气象传感器进行采集，并通过滑动

平均法获得火灾点的气象要素值。火灾点雷达探测特征主要包括回波反射率、径向速度、回波顶高等，这些特征可以通过“火灾杂波过滤法”进行提取。

3.2 多源信息特征层融合

在多传感器对森林火灾进行识别时，每一种传感器都只能获取火灾现场某一方面的信息，单一特征仅包含有限信息，要实现森林火灾的监测，需将多种传感器具有的特征进行提取、融合，综合分析火灾发生的可能性，为后续决策做基础。

由上文可知，影响森林火灾发生的气象要素值存在区间变化的趋势^[11]。因此可以采用逻辑回归算法对数据特征进行提取，本文利用Origin8.0数据分析软件对数据做逻辑回归曲线拟合，得到模型如下：

$$y_1 = \frac{4.25 + \frac{158.76}{e^{\frac{2(x_1-19.9)}{3.17}}}}{121}, \quad (1)$$

$$y_2 = \frac{1.13 + \frac{76.05}{1 + (\frac{x_2}{33.42})^a}}{121}, \quad (2)$$

$$y_3 = \frac{-0.44 + \frac{70.87}{e^{\frac{2(x_3-5.67)}{2.9}}}}{121}, \quad (3)$$

$$y_4 = \frac{31.2 - \frac{25.6}{1 + (\frac{x_4}{4.8})^b}}{121}, \quad (4)$$

$$y_5 = \frac{1.33 + 1541.5e^{\frac{2(x_5-30.92)}{6.48}}}{57}, \quad (5)$$

式中， $a=14.31$ ， $b=19.3$ ； y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 、 y_5 表示火灾发生概率； x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 分别表示日最高温度值、日最小相对湿度值、日最大风速值、日连续未降水天数、雷达回波组合反射率值。

3.3 多源信息决策层融合

决策层融合采用加权平均融合算法。加权平均融合算法通常选用数学平均式，即将各个传感器的权值选取近似相等。该方法是最简单最实用的实时处理信息的融合方法，能比较简便地处理来自传感器的原始冗余信息。加权平均算法中，假设在 n 个传感器的融合系统中，传感器 T_1 、 T_2 、 T_3 、...、 T_n 对同一个目标进行状态估计，各传感器的测量值分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 、...、 x_n ，是 x 的无偏估计，且彼此相互独立，其方差分别为 σ_1^2 、 σ_2^2 、...、 σ_n^2 ^[12]。设各个传感器的权重分别是 W_1 、 W_2 、...、 W_n ，则融合后的状态估计值和权重满

足的条件为：

$$\tilde{x} = \sum_{i=1}^n w_i x_i, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (7)$$

假设权值相等且为 W ，由式(7)可知 $W=1/n$ ，经过融合后的状态估计值为：

$$\tilde{x} = \sum_{i=1}^n w_i x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (8)$$

4 结果分析

4.1 融合等级分析

在多源信息融合的过程中发现，即使所有的要素值都最有利于火灾发生，最后的融合值也达不到100%。因此，本文将各要素中最利火灾发生的数值进行融合，获取基准融合值。最有利于火灾发生的各要素值和融合值如表6所示。

表6 基于多源信息融合的森林火灾发生概率
Table 6 Forest fire occurrence probability based on multi-source information fusion

最高气温 / °C	相对湿度 / %	最大风速 / (m/s)	连续未降水 日数/d	回波反射率 / dBZ	融合值 / %
22.0	20.0	5.7	7	38	52.7

根据森林火灾气象等级划分标准，按照首尾少中间多的顺序升序排列，森林火险气象等级比例设定为10%，20%，40%，80%，100%^[13]，再通过基准融合值(52.7%)对森林火险等级进行划分，得到森林火灾概率等级多源信息融合值表(表7)。

表7 森林火灾发生概率等级多源信息融合值表
Table 7 Multi-source information fusion values of forest fire occurrence probability levels

森林火灾等级	概率/%	融合值/%
极度风险	(90, 100]	(45, 53]
重度风险	(70, 90]	(35, 45]
高度风险	(30, 70]	(15, 35]
中度风险	(10, 30]	(5, 15]
低度风险	(0, 10]	[0, 5]

4.2 实例分析

2015年12月18日自14:04开始，岳阳市雷达图上有一回波块符合林火回波特征，跟踪发现，该回波连续出现了11个体扫(图2)，回波顶高为1.0 km，面积为15.3 km²，平均回波强度为9.1 dBZ，最大回波强度为28 dBZ。为进一步判断该回波是否为林火回波，利用雷达系统监测的位置，通过插值法查找到该监测点多传感器数据，根据本文所研究的基于雷达的多源信息融合森林火灾监测技术，对多传感数据进行融

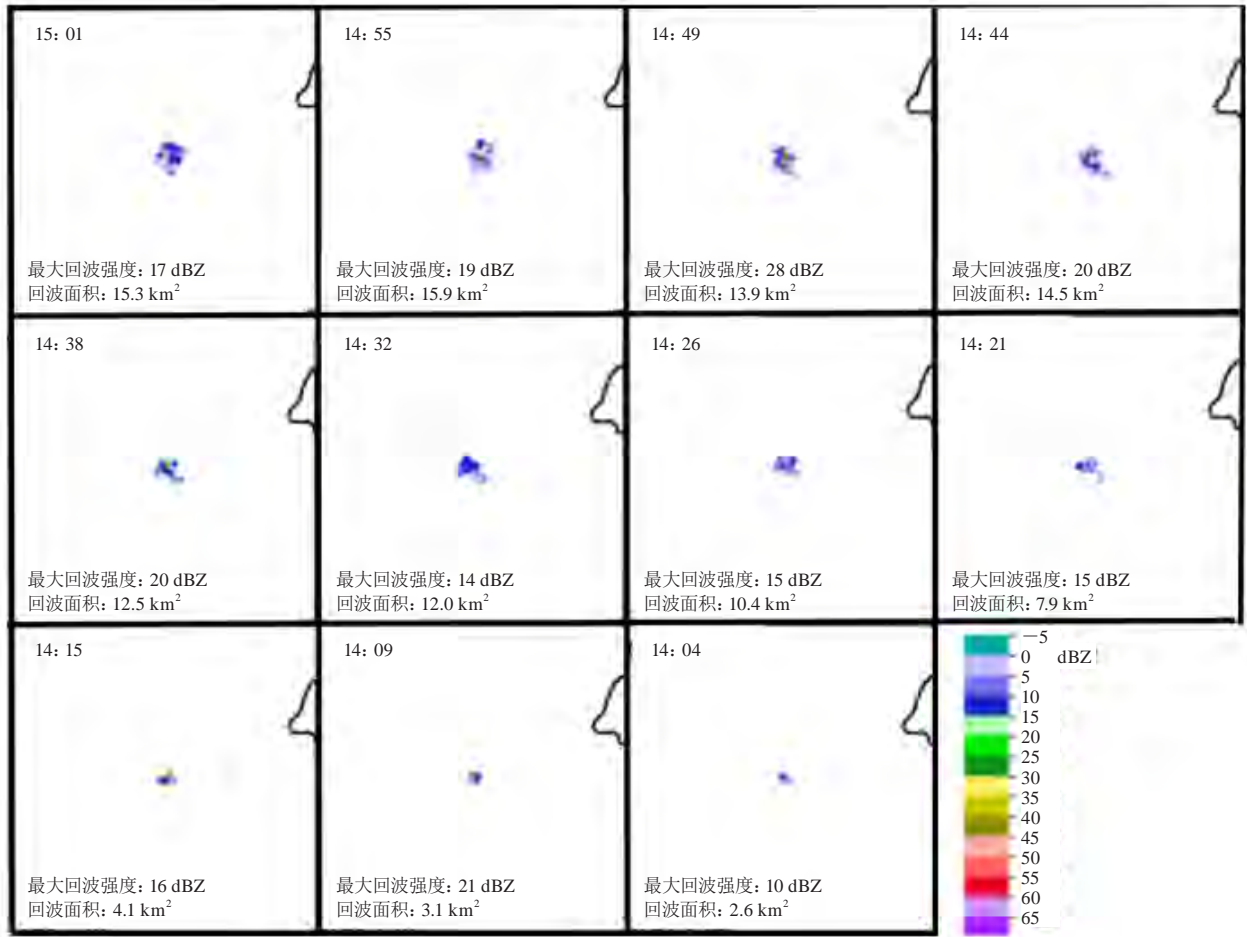


图2 岳阳市林火的雷达反射率回波时序图 (0.5°仰角)

Fig. 2 Radar reflectivity echo timing sequence diagram of Yueyang forest fire (0.5°elevation)

合, 得出林火发生概率值 (表8)。

表8 基于多源信息融合的森林火灾发生概率

Table 8 Forest fire occurrence probability based on multi-source information fusion

	最高气温 /°C	相对湿度 /%	最大风速/ (m/s)	连续未降水 日数/d	回波反射率/ dBZ	融合值 /%
要素值	17.8	30	5.4	5	6	20
概率/%	58.0	52.7	57.2	19.1	49.5	47.3

模型融合值为47.3%, 根据森林火灾发生概率等级多源信息融合值表可知, 该处发生森林火灾的概率等级为极度风险, 因此可以更进一步明确, 该地有森林火灾发生, 该事实也已经被林业部门确认。

4.3 模型检验结果

基于雷达的多源信息融合森林火灾监测模型建立后, 利用模型对岳阳市2018年该地区雷达监测范围内的火情进行实时监测。期间, 系统发出了82起预警信号, 实际没有发生森林火灾但是系统误判发布报警信号的有17起, 实况发生火灾但系统没有发出森林火灾

预警信号的有9起。参照文献[4]中的火情报警的命中率、误警率和临界成功指数的计算方法, 得到系统的火情预警命中率 (表9)。

表9 雷达林火回波监测系统预警命中率统计表

Table 9 Statistical of early warning percentage of radar forest fire echo monitoring system

	命中率	误警率	临界成功指数
概率分布/%	83	10	74

根据钟敏等^[14]对风暴识别与跟踪算法对单体识别的命中率研究结果可知, 雷达林火回波监测系统命中率与CINRAD/SB系统对雷达回波单体识别命中率相当。因此, 该系统的运行结果参考意义较大, 系统可以应用于业务工作之中。

5 结论

基于雷达资料的多源信息森林探测模型建立后, 通过雷达对林火进行定位, 查找疑似火灾点气象信息, 对火灾发生概率进行计算, 查对森林火灾发生概率等级多源信息融合值表, 判断林火发生概率, 决定

是否向森林防火部门发布森林火灾预警信息,有利于及早发现森林火灾,并对火灾进行及时扑救。经验证,该模型对森林火灾的监测精度较高,命中率达到83%,误警率为10%,临界成功率为76%。

多传感器信息融合过程中,在数据处理、特征提取和决策层融合时,采用的算法较普通,在今后的研究中,可以利用不同算法建立模型,选择对森林火灾识别准确率最高的模型,应用到实际业务中,将能极大提高森林火灾监测效率和准确性。

参考文献

- [1] 余福波,吴薇.多源信息融合技术在智能楼宇火灾监测系统中的应用.科技创新与应用,2011(24):16-17.
- [2] 朱泽明.基于物联网技术的智能型森林火灾报警系统的研究及应用.安徽:安徽理工大学,2015.
- [3] 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.气象科学,2010,30(1):121-125.

- [4] 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.气象,2013,9(2):241-248.
- [5] 文东新,张明军,龙定华,等.广西森林火灾时空分布及其影响因素.中南林业科技大学学报,2007,27(5):83-86.
- [6] Fang L, Yang J, Zu J X. Quantifying influences and relative importance of fire weather, topography, and vegetation on fire size and fire severity in a Chinese boreal forest landscape. Forest Ecology and Management, 2015, 356(SI): 2-12.
- [7] 张伟.关于大兴安岭地区森林火灾与气象因素的模型及分析.哈尔滨:东北林业大学,2015.
- [8] 郑焕能.应用火生态.哈尔滨:东北林业大学出版社,1998.
- [9] 傅泽强,陈动,王玉彬.大兴安岭森林火灾与气象条件的相互关系.东北林业大学学报,2001,29(1):12-15.
- [10] 王世刚.基于现代时间序列分析方法的通用信息融合白噪声估值器.黑龙江:黑龙江大学,2008.
- [11] 王威,冯慧,丁俊琦,等.影响森林火灾发生的气象因子分析.通讯世界,2019(3):227-228.
- [12] 黄健,徐永刚,孙中廷.多传感器数据融合技术在煤矿井下的应用.煤矿机械,2015(7):242-244.
- [13] 郭海峰,禹伟.湖南省森林火灾天气等级预测模型研究.中南林业科技大学学报,2016,36(12):44-47.
- [14] 钟敏,吴翠红,王珊珊,等.CINRAD/SA雷达两种识别跟踪产品的评估分析.气象,2012,38(6):722-727.

(上接100页)

且高度较高,冷式切变下强水平风脉动和垂直风脉动出现的较为分散且高度较低。

2) 降水前或降水出现增大前在2~3 km高度附近出现水平风的垂直风切变并向低层传播,降水时低层和高层的水平风的垂直风切变增大至10 m·s⁻¹以上;暖式切变形势下低层水平风的垂直风切变增强时间较降水早2~6 h,整层大气扰动时间短;冷式切变形势下低层水平风的垂直风切变的增强时间与降水同步,整层大气扰动时间长。

3) 暖式切变形势下,低空急流指数相对连续,且波动较大,对应降水的强度较强,降水分布不均;冷式切变形势下,低空急流指数较为分散,波动较小,对应降水强度较弱,降水分布均匀。降水前低空急流指数的增大超前1~4 h。

4) 暖式切变降水阶段,SNR强回波区在降水初期出现在较高的高度上,在降水趋于减弱时低层SNR值开始增大;冷式切变降水阶段,SNR强回波区在低层长时间维持。

参考文献

- [1] 周志敏,万蓉,崔春光,等.风廓线雷达资料在一次冰雹过程分析中的应用.暴雨灾害,2010,29(3):251-265.
- [2] 董保举,付志嘉,李明,等.风廓线雷达资料在暴雨天气过程特征分析中的应用.气象科技,2012,40(1):74-86.
- [3] 王彦,刘一玮,孙晓磊.利用风廓线雷达资料分析一次强降水过程的风垂直切变特征.暴雨灾害,2017,36(2):172-176.
- [4] 张怪怪,胡明宝,邓少格,等.利用风廓线雷达资料对暴雨与低空急流关系的分析.气象水文海洋仪器,2011,28(1):32-35.
- [5] 刘淑媛,郑永光,陶祖钮.利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系.热带气象学报,2003,19(3):285-290.
- [6] 王秀玲,陈昱.层状云降水过程中的风廓线特征.气象科技,2010,38(4):439-421.
- [7] 陈娟,尹洁,何文,等.风廓线雷达资料在江西梅雨锋暴雨天气过程中的分析应用.气象与减灾研究,2016,39(3):206-215.
- [8] 戴建华,陶岚,丁杨,等.一次罕见飑前强降水超级单体风暴特征分析.气象学报,2011,70(4):619-627.
- [9] 李峰,施红蓉.一次多相态天气过程的风廓线雷达探测资料特征分析.气象,2014,40(8):992-999.
- [10] 许玉貌,刘红年,徐桂玉.大气科学概论.南京:南京大学出版社,2000.
- [11] 陆汉城.中尺度天气原理和预报.北京:气象出版社,2000.
- [12] 李佩,周佳茜,叶小峰,等.基于动力因子的萍乡市一次区域性暴雨落区诊断分析.气象与减灾研究,2016,39(1):41-47.
- [13] 王晓蕾,阮征,葛润生,等.风廓线雷达探测降水云体中雨滴谱的试验研究.高原气象,2010,29(2):498-505.
- [14] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕.雷达气象学.北京:气象出版社,2001.