

冯晋勤, 黄爱玉, 张治洋, 等. 基于新一代天气雷达产品闽西南强对流天气临近预报方法研究[J]. 气象, 2012, 38(2): 197-203.

基于新一代天气雷达产品闽西南强对流 天气临近预报方法研究^{*}

冯晋勤 黄爱玉 张治洋 王新强

福建省龙岩市气象局, 龙岩 364000

提 要: 利用 2003—2008 年福建龙岩新一代天气雷达资料和常规探空资料, 对闽西南历史冰雹及闽西雷雨大风天气发生的环境条件进行统计分析, 建立历史冰雹和雷雨大风天气过程对应的新一代天气雷达产品判别指标。利用判别方程、新一代天气雷达产品和探空资料联合开展强对流天气临近预报预警方法研究: 首先利用 Fisher 判别分析方法建立冰雹天气的判别方程, 主要用于冰雹天气的判断, 再利用雷雨大风的判别指标对雷雨大风和强雷暴天气进行第二次判别。通过历史过程的回报和 2009 年的试报表明: 该系统对闽西南冰雹天气预报准确率较高, 雷雨大风准确率次之。同时, 利用风暴单体识别与跟踪的预测方法对冰雹预报结果和实况进行统计, 表明风暴单体识别和跟踪算法(SCIT)预报准确率较高, 可以用于风暴未来移速移向的预报。

关键词: 新一代天气雷达, 判别分析, 冰雹, 雷雨大风, 预警方法

Studies on Strong Convective Weather Forecast Method in Southwestern Fujian Province Based on CINRAD/SA Radar Products

FENG Jinqin HUANG Aiyu ZHANG Zhiyang WANG Xinqiang

Longyan Meteorological Office of Fujian Province, Longyan 364000

Abstract: By using the radar of Longyan CINRAD/SA from 2003 to 2008 and $T-\ln p$ data, the environmental conditions of historical hail in southeastern Fujian and thunderstorm and gale weather in Western Fujian were analyzed and the CINRAD/SA products' discriminant indices of historical hail weather and thunderstorm and gale weather in Southeastern Fujian were statistically established. Utilizing discriminant equations, CINRAD/SA products and $T-\ln p$ data, we carry out the strong convective weather nowcasting and the research of warning methods. First, we set up Fisher discriminant equations, which are mainly used to identify hail weather. Then we set up the second Fisher discriminant equations, which are mainly used to identify thunderstorm and gale weather. Through the hindcast of historical process and the 2009 trial forecast, it is shown that the forecast accuracy for hail weather system in southwestern Fujian is higher than that of the thunderstorm and gale weather in western Fujian. Using SCIT (storm cell identification and tracking) algorithm, the hail forecasting and validation were statistically tested, results showed that the SCIT method forecasts accurately and it can be used to forecast the storm moving speed and direction.

Key words: CINRAD/SA radar, discrimination analysis, hail, thunderstorm wind, warning method

* 福建省科技厅区域重大项目(2009Y3005)及福建省自然科学基金项目(2010J01244)

2011 年 2 月 14 日收稿; 2011 年 9 月 18 日收修定稿

第一作者: 冯晋勤, 主要从事短时短期预报技术研究. Email: lyfjq@hotmail.com

引言

冰雹、雷雨大风等强对流天气是福建省主要的灾害性天气,尤其是每年的春夏两季,强对流天气频繁发生,往往造成重大的经济和人员财产损失。冰雹、雷雨大风天气尺度小、局地性强、生命史短,但破坏性严重,强对流性天气的预警和落区预报一直是气象工作者研究的重点。近几年来,许多学者对福建的强对流天气做了大量的研究工作,如,蔡义勇等^[1]分析了 1960—2008 年福建冰雹发生的时空分布和春夏两季降雹的天气气候特征;朱艳萍等^[2]分析了 1980—1999 年福建春季冰雹天气的物理量诊断分析,陈秋萍等^[3]对福建强天气短时潜势预报方法进行了研究。对雷达观测资料在冰雹、雷雨大风等强对流天气的分析应用得到气象工作者普遍关注^[4-10],如,冯晋勤等^[4]利用新一代多普勒天气雷达分析了一次冬季降雹过程的雷达回波特征,郭艳^[5]对大雹指标 TBSS 在江西的应用做了详细的分析。刘治国等^[6]对冰雹云和雷雨云单体 VIL 演变特征进行对比分析。王珏等^[7]对鄂东地区雷雨大风多普勒天气雷达回波特征进行了分析。

文章利用龙岩新一代天气雷达资料,结合常规探空资料,对闽西南冰雹、闽西雷雨大风和强雷暴历史过程的雷达资料进行统计分析,建立冰雹、雷雨大风新一代天气雷达产品判别指标、预报方程以及闽西南强对流天气短时临近预报预警系统,实现对闽西南强对流天气临近预警预报。

1 资料的收集和整理

1.1 资料收集

收集 2003—2008 年闽西南(龙岩、漳州、厦门、泉州四个地区)的 39 次冰雹天气过程,其中龙岩 23 次过程、漳州 2 次过程、厦门 3 次过程、泉州 11 次过程。同时,选取 2003—2008 年龙岩地区 43 次测站有大风记录的雷雨过程和风暴强中心大于 50 dBz、风暴垂直积分液态含水量(VIL)大于 $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、回波顶高(ET)大于 8 km 的 60 个显著回波风暴,龙岩的 23 次冰雹过程以及 43 次雷雨大风(风速 $\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)过程用于预报方程的建立,闽南的 16 次冰雹过程用于方程回代检验。

需要说明的是,雷达观测到的显著回波风暴可

产生冰雹、雷雨大风、一般雷暴或暴雨等天气,也可能几种天气同时出现,在个例选取中,产生冰雹天气的风暴个例也可能产生雷雨大风天气,但在统计中以冰雹灾害为重,即仅归入冰雹天气统计,43 次雷雨大风天气确定不产生冰雹天气,选取的 60 个显著回波风暴均在地面测站附近,确定不产生冰雹或雷雨大风天气。以下如无特殊说明,文章中的显著回波风暴均指强中心大于 50 dBz、风暴垂直积分液态含水量(VIL)大于 $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、回波顶高(ET)大于 8 km 且不产生冰雹或雷雨大风天气的风暴,所产生的天气称为强雷暴天气。雷雨大风天气仅选取龙岩地区 7 个测站的原因,主要是考虑在距离雷达远的地方,由于地球曲率的影响,雷达无法观测到天气系统低层的雷达回波特征,所选取的过程均发生在龙岩新一代天气雷达 120 km 观测范围内。

1.2 资料整理

利用新一代天气雷达风暴的单体识别和跟踪算法(SCIT)对风暴自动识别的结果,对出现冰雹、雷雨大风、显著回波风暴的雷达产品从风暴生成到消亡进行逐时次统计,统计参数分别为:风暴所对应的时间、方位、距离、风暴垂直积分液态含水量(VIL)、风暴最强回波强度(dBZ_M)、最强回波所对应高度(HT)、风暴顶高(TOP)、风暴移向、移速(FCST MVMT)及回波顶高(ET)。这些参数可以分别从敏视达公司 PUP 软件自动生成的组合反射率中的风暴属性表以及回波顶高产品中读取。在建立判别方程时,冰雹和雷雨大风的雷达参数以出现冰雹或雷雨大风时刻为准,无具体时间的则以报道时间前 1 小时内最强回波出现的时间为准。同时,利用常规探空资料统计每次强天气过程的对流有效位能(CAPE)、0℃层、-20℃层、垂直风切变、-20℃与 0℃层的高度差等参数。

2 冰雹、雷雨大风发生的环境条件对比分析

决定对流产生的 3 个要素是大气层结的垂直稳定度、水汽条件和抬升机制。大量的研究发现,大冰雹(降雹直径大于 2 cm 以上)的产生主要受到 4 个环境参量影响^[11]:对流有效位能(CAPE)和对流抑制能量(CIN)、垂直风切变、0℃和 -20℃层高度。对流有效位能(CAPE)越大,雷暴出现后其内部的上升气流也就越强,因此出现强冰雹的可能性随着

对流有效位能的增加而增加。对流抑制能量(CIN)是反映对流发生之前与能量储存相关的参数。研究表明^[12],对于发生强对流的情况,通常CIN有一较为合适的值:太大,抑制对流程度大,对流不容易发生;太小,不稳定能量不容易在低层积聚,不太强的对流很容易发生,从而使对流不能发展到较强的程度。垂直风切变即风向风速随高度的变化,是决定对流风暴的组织结构和强弱的关键因子之一。垂直风切变可根据6 km和地面之间风矢量之差的绝对值(也可用500 hPa和地面之间风矢量差)计算,垂直风切变大于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为较强垂直风切变, $15 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为中等偏上强度垂直风切变,小于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 则为弱垂直风切变。出现冰雹需要 0°C 层离地面高度适中,一般要求 0°C 层在600 hPa(4 km)上下, -20°C 层高度在400 hPa等压面附近, -20°C 与 0°C 层之间厚度越小,越有利于产生冰雹,产生大冰雹要求, -20°C 等温线对应高度之上有超过50 dBz的反射率因子, 0°C 层距地面的高度不超过4.5 km。

据统计,龙岩23个冰雹过程21天的CAPE、利用午后地面温度、露点订正后的CAPE、CIN、垂直风切变(500 hPa和地面之间风矢量差)、 -20°C 与 0°C 层高度及厚度差平均值分别达 $703.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $781.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $268.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $15.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 7884.2 m (382.9 hPa)、 4585.6 m 及 3298.6 m ,CAPE最大值达 $2761.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,垂直风切变最大达 $29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,强垂直风切变有4个,中等垂直风切变有7个,实况中7次大冰雹过程中有5次过程的垂直风切变大于中等以上的强度,大冰雹过程 0°C 层距地面的高度为4.6 km。对闽西南39次冰雹天气31天过程统计CAPE、利用午后地面温度、露点订正后的CAPE、CIN、垂直风切变(500 hPa和地面之间风矢量差)、 -20°C 与 0°C 层高度及厚度差平均值分别达 $721.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1056.2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $240.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $14.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 7970.1 m 、 4664.9 m 及 3305.2 m 。从统计资料可以看出,闽西南冰雹产生的环境条件符合产生冰雹天气的要求。龙岩43次雷雨大风过程32天的CAPE、利用午后地面温度、露点订正后的CAPE、CIN、垂直风切变(500 hPa和地面之间风矢量差)、 -20°C 与 0°C 层高度及厚度差分平均值别达 $647.0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $743.6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $217.0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $11.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 8318.2 m 、 5296.7 m 及 3021.5 m 。可以看出,利用午后地面温度和露点订正后的CAPE大于08或20时探空

计算的CAPE,冰雹的CAPE、CIN、垂直风切变值大于雷雨大风,雷雨大风天气的 -20°C 与 0°C 层的高度高于冰雹天气。

3 研究方法及其预报方程建立

3.1 判别分析法

判别分析法是定性分类判别的一种方法,它是根据判别对象不同类别,选择适当的判别因子,在不同类别的样本内,寻找判别因子与判别对象的关系,建立判别因子与判别对象不同类别的预报方程,选择适当的判别规则,判别某次多个判别因子观测样本所属的天气类型。常用的判别分析法主要有:距离判别、Fisher判别、Bayes判别、逐步判别法。气象上主要采用Fisher判别、Bayes判别、逐步判别法。一般来说,Bayes判别要求数据分布是多元正态分布,Fisher判别对数据分布没有特殊的要求,逐步判别是在对判别因子进一步筛选的基础上建立判别方程。

本文选用Fisher判别方法,对冰雹、雷雨大风、强雷暴天气进行两次二级判别:即将预报类型分为3类:冰雹天气、雷雨大风天气和强雷暴天气,先预报是否产生冰雹天气,若不产生冰雹天气,则再进行雷雨大风或强雷暴天气的判别。

3.2 判别因子选择

预报方程的建立首先需要寻找好的判别指标,对冰雹天气进行定性判别,需选取与产生冰雹相关性好的参数。首先选取风暴最强回波强度作为反映风暴强弱的重要指标;风暴垂直积分液态含水量(VIL)表示将反射率因子数据转换成等价的液态水值,是用来判断对流风暴强度的一个十分有用的参量,但它的阈值随季节变化,Amburn研究表明^[13],如果VIL密度(VIL/ET)超过 $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,则风暴肯定会产生直径超过2 cm的大冰雹,因此,选取VIL密度指标判断冰雹天气;由于冰雹增长都在 0°C 层高度以上, 0°C 层上部的VIL反映的是 0°C 以上降水粒子分布的情况,所以, 0°C 层高度以上VIL也能反映冰雹生长过程,因此我们选取VIL密度 \times (回波顶高 -0°C 层高度)来表示冰雹增长的情况;同时,判断大冰雹最有效的方法是检查较高的反射率因子能否扩展到 0°C ,特别是一 20°C 等温线高度以上,因此,我们选取最强回波高度 -0°C 层高度来表示冰雹

发展的强度,风暴顶高(-20°C 层高度)表示冰雹云发展的高度。

为验证以上参数选取是否适用,首先,简单分析产生冰雹、雷雨大风天气的风暴以及显著回波风暴垂直积分液态含水量(VIL)、最强回波强度($dBZM$)及回波顶高(ET)特征,经统计(见表 1),产生冰雹天气的风暴 VIL 值以及风暴的最强回波强度值较大,而显著回波风暴、产生雷雨大风及冰雹对应风暴的回波顶高差别并不大,但由于用 VIL 判断对流风暴强度的阈值随季节变化,因此,仅以 VIL 、最强回波强度及回波顶高进行冰雹天气判断是不够的。

表 1 强天气雷达产品参数统计特征值

Table 1 Statistical eigenvalues of severe weather radar product parameters

天气类型	VIL / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	$dBZM$ / dBz	ET / km
冰雹	45.58	64	11.12
雷雨大风	27.26	57.56	11.08
强雷暴	24.37	56.37	10.27

再对选取的 5 个判别指标进行统计分析。以下分别用 $dBZM$ 、 $VILM$ 、 H_0 、 H_{20} 和 $VILE$ 表示风暴最强回波强度、 VIL 密度、最强回波高度 0°C 层高度、风暴顶高(-20°C 层高度)和 VIL 密度 \times (回波顶高 0°C 层高度)5 个判别指标,风暴垂直积分液态含水量(VIL)、风暴最强回波强度($dBZM$)、最强回波所对应高度(HT)、风暴顶高(TOP)可从敏视达公司 PUP 软件自动生成的组合反射率中的风暴属性表读取,回波顶高是指在 ≥ 18 dBz 反射率因子被探测到时,以最高仰角为基础的回波顶高度,也即回波顶高(ET)产品。风暴顶高是指 ≥ 30 dBz 反射率因子被探测到时,最高仰角中风暴分量几何中心的高度。由表 2 可以看出,冰雹与雷雨大风对应风暴及显著回波风暴在这 5 个判别指标上差别较大,最强回波高度在 0°C 层以上,风暴顶高与 -20°C 层高度的厚度差(H_{20})较大,说明对应冰雹天气的风暴发展强度高、高度高。为进一步验证这 5 个判别指标的可靠性,分别计算这 5 个指标与冰雹天气的相关系数分别为:0.69、0.77、0.50、0.57 和 0.62,当相关系数 ≥ 0.4 即为显著性相关, ≥ 0.7 时则为高度相关,所以,这 5 个指标与冰雹天气的相关性都较高,以 VIL 密度($VILM$)0.77 相关系数为最大。

冰雹天气判别指标选取后,为进一步区分雷雨大风和显著回波风暴,需寻找与产生雷雨大风相关性好的雷达回波参数,在雷雨大风雷达回波特征的

表 2 冰雹天气雷达产品判别指标统计特征值

Table 2 Statistical eigenvalues of hail weather radar product discrimination indices

天气类型	$dBZM$ / dBz	$VILM$ / $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	H_0/km	H_{20}/km	$VILE/g\cdot\text{m}^{-2}$
冰雹	64	4.25	0.84	2.97	26.72
雷雨大风	57.56	3.13	-0.57	0.51	15.53
强雷暴	56.37	3.22	-0.57	-0.19	13.28

分析中,有研究表明^[6-7],发生雷雨大风时,回波顶、强回波中心高度及 VIL 值将下降。通过分析 43 个雷雨大风的个例(表 3),表明在发生雷雨大风时,通过前后时刻雷达产品对比,强回波中心高度及 VIL 值下降较明显,而回波顶高下降不显著,而选取的 60 个显著回波风暴前后时刻回波顶高、强回波中心高度及 VIL 值变化无规律。通过计算强回波中心高度、 VIL 下降值以及 H_{20} 与雷雨大风天气的相关系数为:0.19、0.28、0.17,显著性水平 $\alpha=0.1$ 时,查相关系数检验表得 $r_c=0.16$,通过相关性检验。

表 3 雷雨大风天气雷达产品判别指标统计特征值

Table 3 Statistical eigenvalues of thunderstorm and gale weather radar product discrimination indices

天气类型	强回波中心下降 高度/ km	VIL 下降值 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	H_{20}/km
雷雨大风	0.56	2.86	0.51
强雷暴	-0.04	-1.03	-0.19

3.3 预报方程的建立

由于判别分析方法的一个特点即计算量巨大,在统计过程中借用最常用的 SPSS 统计分析软件进行预报方程的建立。为了便于比较,在预报方程建立前,需对选取的判别指标用 $X_{\sigma}=(X_i-\bar{X})/S$ (\bar{X} 为平均值、 S 为标准差)公式进行无量纲化处理,将无量纲化处理后的冰雹天气对应 5 个判别指标的 132 个样本以及雷雨大风天气对应 3 个判别指标的 103 个样本分别输入 SPSS 软件,软件将自动输出两组预报方程。在预报中先对风暴进行筛选,若风暴强中心大于 50 dBz、 $VIL > 20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $ET > 8 \text{ km}$,则将相应的预报因子先代入第一组冰雹预报方程,比较 Y_1 、 Y_2 大小,若 $Y_1 > Y_2$,则预报为冰雹天气;否则预报为无冰雹天气,并将判别指标代入第二组雷雨大风预报方程,再比较 Y_3 、 Y_4 大小,若 $Y_4 > Y_3$,则预报为雷雨大风天气;否则预报为强雷暴天气。两组预报方程如下。

(1) 第一组判别预报方程:

冰雹: $Y_1 = VILE \times (-0.738) + H_{20} \times (-0.318) + H_0 \times (-0.160) + dBzM \times (-0.317) + VILM \times (-0.738) - 0.898$

雷雨大风、强雷暴: $Y_2 = VILE \times 2.62 + H_{20} \times 1.131 + H_0 \times 0.568 + dBzM \times 1.128 + VILM \times (-1.327) - 3.283$

(2) 第二组预报方程:

强雷暴: $Y_3 = VIL \text{ 差} \times (-0.264) + \text{强回波高度差} \times (-0.175) + H_{20} \times (-0.107) - 0.745$

雷雨大风: $Y_4 = VIL \text{ 差} \times 0.377 + \text{强回波高度差} \times 0.249 + H_{20} \times 0.152 - 0.8$

4 预报系统的回代检验和试报效果分析

4.1 历史样本回报

将 60 个显著回波风暴、43 个雷雨大风 23 次冰

雹过程和 29 个冰雹判别因子代入第一组预报方程进行回代检验,29 个冰雹正确识别 27 个,2 个判断为雷雨大风、强雷暴天气,正确率达 93.1%;再将 43 个雷雨大风和 60 个显著回波风暴个例代入第二组预报方程,正确识别雷雨大风 30 个,雷雨大风正确识别率为 69.8%。从第一组判别得分做出的直方图(图 1)可以看出,该判别方程对区分冰雹和强雷暴或是雷雨大风还是比较明显的。从回报结果看,判别方程对于识别冰雹天气准确率高,其次为雷雨大风。分析雷雨大风天气准确率远低于冰雹天气的原因,一是因为雷雨大风的判别因子较难寻找,相关系数低;二是因为龙岩雷达站海拔高(约 1500 m),雷达回波特征不能完全代表地面实况出现雷雨大风的特征。

对 6 例具有详细实况的冰雹对应风暴进行预警提前量分析,预报方程对 6 次过程均提前做出预警,其中 5 次过程提前 45 分钟以上预警时间,最长提前 1 小时 20 分,1 次过程提前 20 分钟。

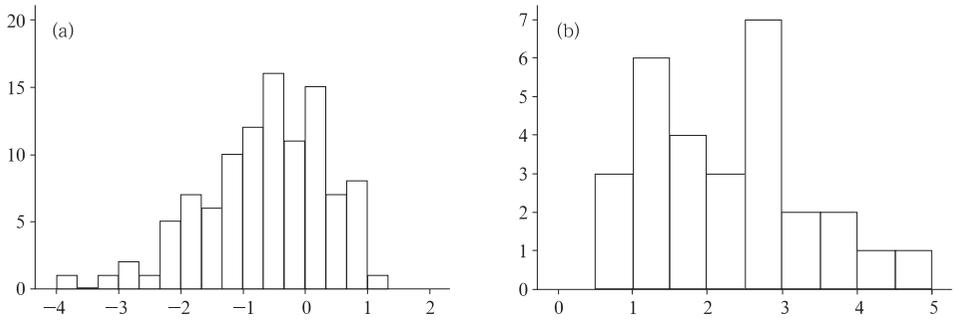


图 1 判别得分直方图
(a) 强雷暴和雷雨大风天气对应的风暴的判别得分, (b) 冰雹天气对应的风暴的判别得分
Fig. 1 Discriminant scoring histograms for (a) the thunderstorm and severe storm weather, and (b) the hail weather

4.2 对 2003—2008 年闽南地区的冰雹过程回代检验

对闽南地区 16 次冰雹过程所对应 17 个风暴从生成到消亡全程进行回代检验,17 个风暴均识别出冰雹,识别率达 100%。有冰雹出现具体时段的 7 次过程中,27 个时次风暴识别出 18 次冰雹,准确率达 66.7%。分析准确率不高的原因,因为出现冰雹的地区距龙岩雷达站 100 km 以外,最低仰角离地面已有 3 km,而出现降雹时,回波强中心已明显下降,3 km 以下的强回波将探测不到,所以雷达探测到的强中心不一定能代表回波强中心的强度,相应的 VIL 值也可能偏小,在一定程度上影响到冰雹的判断。

对 7 例具有详细实况的个冰雹对应风暴进行预

警提前量分析,7 次过程均提前做出预警,预警时间最长提前 1 小时 42 分,最短为 6 分钟,对最长 1 小时 42 分的风暴进行分析,主要是风暴经过的地方为无人居住的山区,可能已出现冰雹,但无法得到实况。

4.3 2009 年 3—6 月冰雹、雷雨大风试报效果

我们对 2009 年 3—6 月的 7770 个时次风暴(风暴强中心大于 50 dBz、 $VIL > 20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $ET > 8 \text{ km}$)进行验证,共预报 51 个风暴 93 个时次出现冰雹,23 个风暴出现在海上、江西省和广东省,因此无法对实况进行验证,其余 28 个风暴分布在龙岩、漳州、厦门、泉州和莆田 5 个地区,其中龙岩 13 个、漳州 9 个、厦门 4 个、莆田 1 个、泉州 1 个,分布时间为 3 月 1 个、4 月 10 个、5 月 9 个、6 月 8 个。从判断为

冰雹的风暴持续时间看,7 个风暴持续时间超过 2 个体扫,对应实况,2009 年 4 月 13 日龙岩、厦门出现冰雹天气,5 个风暴均作出正确判断,其中漳州诏安 1 个风暴出现 3 体散射现象,虽然没有实况,但可认为出现降雹,6 月 13 日漳州长泰 1 个风暴判断出现冰雹的时间为 3 个体扫,但由于风暴未出现在本站,实况无法验证。1 个判断为冰雹的风暴在漳州平和、龙海交界处,出现 2 个体扫但时间不连续(相隔 12 分钟),没有实况无法进行判断。其余 20 个仅为 1 个体扫,一般情况下,出现冰雹对应的风暴应持续 2 个体扫以上,从实况上看,对应这 20 个风暴均未出现冰雹,所以是否出现冰雹的正确性有待进一步检验。

对 2009 年 4 月 13 日龙岩、厦门冰雹实况进行冰雹提前预警时间分析:上杭洋境乡于 15 时 45—48 分左右出现冰雹,系统于 14 时 41 分提前 1 小时进行了冰雹预警,持续 1 个体扫,15 时 17 分再次预警,连续 7 个体扫的预警从 15 时 35 分开始,预警提前量为 10 分钟;16 时 24 分该风暴再次连续 2 个体扫预警,比实况(16 时 40 分)提前 16 分钟。厦门同安于 18:50—19:15 出现冰雹,风暴于 18 时 37 分开始连续 9 个体扫进行预警,提前量为 13 分钟。

从以上分析可以看出,对持续两个个体扫以上判断为冰雹的风暴的准确率较高,达 85.7%,仅出现 1 个体扫的风暴判断的正确性有待进一步检验。从持续 2 个体扫以上的预警提前量来看,提前 10~16 分钟。

对 2009 年龙岩 7 个县市 7 次雷雨大风进行检验,共识别出 5 次过程,准确率为 71.4%。

5 新一代天气雷达的风暴单体识别与跟踪的预测方法检验

风暴的单体识别和跟踪算法(SCIT)是新一代天气雷达中的一个重要算法,可用于识别风暴单体并提供风暴单体的位置预报,它是根据单体运动向量直接外推得到的,单体运动向量的计算使用线性最小二乘拟合从风暴单体目前的直到前 10 个体扫的位置,各个体扫的位置是等权重的,并在每一个体扫中实时更新进行外推^[14]。Johnson 等^[15]对美国 6561 个风暴单体做了统计分析,对最大反射率因子超过 50 dBz 的单体能识别出 90%以上。在 1998 年 3 月 NEXRAD 业务支持处(OSF)对 WSR-88D 用户民意调查结果中显示风暴的单体识别和跟踪产品

的准确度达 93%^[16]。对单体位置预报评估中,对 898 个风暴单体统计误差,5 分钟 2 km、15 分钟 5 km、30 分钟 9.9 km、45 分钟 15.2 km 和 60 分钟 22.8 km^[11]。

为此,我们直接使用新一代天气雷达根据 SCIT 算法识别出来的风暴单体进行风暴预测方位、距离误差的统计。对 2003—2008 年龙岩出现冰雹天气对应的 29 个风暴 430 个体扫的风暴位置预报进行 12 分钟、30 分钟、42 分钟、60 分钟的误差检验。检验中根据风暴提供的未来移向、移速计算风暴未来 12 分钟、30 分钟、42 分钟、60 分钟的方位和距离,并与风暴的实况做比较,计算方位和距离误差。经统计,新一代天气雷达的风暴单体识别与跟踪的预测方法对冰雹 12 分钟、30 分钟、42 分钟及 60 分钟的方位、距离的预测误差分别为:1.29°/1.83 km、2.40°/3.88 km、3.01°/5.18 km、3.81°/6.26 km。从统计资料可以看出,新一代天气雷达的风暴单体识别与跟踪的预测方法对冰雹对应风暴的预报准确率还是较高的,可以应用其进行未来移速移向的预报。

6 基于新一代天气雷达的强对流天气临近预报预警系统

预报方程、风暴单体识别和跟踪算法、风暴位置预报方法建立后,为实现强天气的自动预警预报,我们用 VC 开发了冰雹、雷雨大风临近预报预警系统(图 2),该系统实时自动读取当天探空资料-20℃与 0℃层高度,并对新一代天气雷达风暴自动识别的结果进行显著回波风暴(风暴强中心大于 50 dBz、VIL > 20 kg·m⁻²、ET > 8 km)的判断,若为显著回波风暴则根据相应的新一代天气雷达产品计算冰雹和雷雨大风的判断指标,代入预报方程进行强天气判断,预报将出现冰雹、雷雨大风天气时,系统自动在地理信息图上显示位置,预报其未来 30 分钟、60 分钟的移动方向和位置,并通过声音、文本预警,为强天气系统下游影响区域提供临近预报。

7 结论

(1) 通过分析冰雹、雷雨大风天气的雷达回波特征分析,结合常规探空资料,选取冰雹、雷雨大风天气雷达判别指标,应用判别分析方法建立闽西南强对流天气临近预报预警方程。

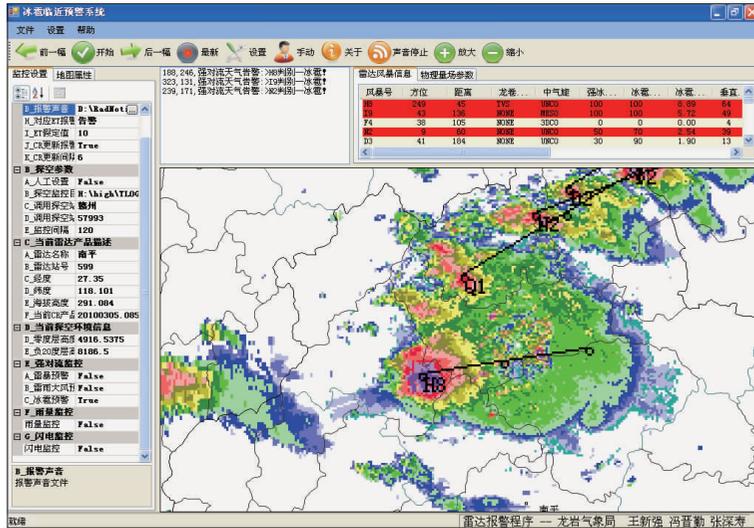


图 2 强对流天气临近预报预警系统
Fig. 2 A severe convective weather nowcasting system

(2) 根据历史资料回报及检验的结果来看, 预报方程对冰雹天气的预报准确率较高, 在预报过程中, 对持续两个体扫以上判断为冰雹风暴的准确率较高, 在 2009 年试报过程中, 冰雹预报准确率达 85.7%, 从预报提前量来看, 最短时效为 1 个体扫, 最长为 1 小时 42 分钟。雷雨大风准确率为 69.8%, 对 2009 年 7 次雷雨大风识别的准确率为 71.4%。

(3) 通过新一代天气雷达自带的风暴单体识别和跟踪算法(SCIT)对风暴单体未来移速移向进行统计分析, 结果表明我国新一代天气雷达的风暴单体识别和跟踪算法预报准确率较高, 可以用于风暴未来移速移向的预报。

(4) 预报方程只对近年来闽西南冰雹过程和闽西雷雨大风天气进行回代检验, 其余地区的过程未经过检验, 方程的适用性有待在业务应用过程中进一步进行检验。同时, 在实际应用中, 应选择就近的雷达站点进行预报较为准确。在今后工作中, 对雷雨大风的判别指标需进一步总结, 以提高雷雨大风天气的预报准确率。

(5) 在业务上建立基于新一代天气雷达产品的冰雹、雷雨大风识别流程: 先对风暴进行筛选, 若风暴强中心大于 50 dBz、VIL 大于 20 kg · m⁻²、回波顶高大于 8 km, 则将相应的预报因子先代入第一组冰雹预报方程, 若判断为冰雹, 则不再进行雷雨大风识别; 若预报为无冰雹天气, 则将判别指标代入第二组雷雨大风预报方程, 进行雷雨大风天气的判别。

参考文献

[1] 蔡义勇, 王宏, 余永江. 福建冰雹时空分布与天气气候特征分

析[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(4): 43-48.
 [2] 朱艳萍, 刘爱鸣, 李白良. 福建春季冰雹天气物理量诊断分析[J]. 气象科技, 2006, 34(1): 73-77.
 [3] 陈秋萍, 冯晋勤, 李白良, 等. 福建强天气短时潜势预报方法研究[J]. 气象, 2010, 36(2): 28-32.
 [4] 冯晋勤, 罗保华. 一次冬季降雹过程的 CINRAD/SA 回波特征[J]. 气象, 2004, 30(5): 21-24.
 [5] 郭艳. 大冰雹指标 TBSS 在江西的应用研究[J]. 气象, 2010, 36(8): 40-46.
 [6] 刘治国, 陶健红, 杨建才, 等. 冰雹云和雷雨云单体 VIL 演变特征对比分析[J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1363-1374.
 [7] 王珏, 张家国, 王佑兵, 等. 鄂东地区雷雨大风多普勒天气雷达回波特征[J]. 暴雨灾害, 2009, 28(2): 143-146.
 [8] 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.
 [9] 陈晓燕, 付琼, 岑启林, 等. 黔西南州一次分裂型超级单体风暴环境条件和回波结构分析[J]. 气象, 2011, 37(4): 423-431.
 [10] 陈贵川, 湛芸, 乔林, 等. 重庆“5.6”强风雹天气过程成因分析[J]. 气象, 2011, 37(7): 871-879.
 [11] 吴剑坤, 俞小鼎. 强冰雹天气的多普勒天气雷达探测与预警技术综述[J]. 干旱气象, 2009, 27(3): 197-206.
 [12] 刘健文, 郭虎, 李耀东, 等. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 141-143.
 [13] Amburn S A, Wolf P L. VIL density as a hail indicator[J]. Weather and Forecasting, 1997, 12: 472-478.
 [14] 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: 187-197.
 [15] Johnson J T, et al. The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR-88D algorithm[J]. Weather and Forecasting, 1998, 13: 263-276.
 [16] Lee R R. WSR-88D 算法和产品改进的用户反馈信息[J]. 气象科技, 2000, 28(3): 56-58.