

王俊, 龚佃利, 周黎明, 等. 2013. 山东降水回波移动特征分析. 气象, 39(10): 1344-1349.

# 山东降水回波移动特征分析<sup>\*</sup>

王 俊<sup>1</sup> 龚佃利<sup>1</sup> 周黎明<sup>1</sup> 杨晓霞<sup>2</sup>

1 山东省人民政府人工影响天气办公室, 济南 250031

2 山东省气象台, 济南 250031

**提 要:** 利用济南新一代多普勒雷达在4年之间获取的217个观测资料, 分析了回波的移动特征。主要结果为: (1) 计算了回波移动速度、方向, 结果表明回波移动速度在 $10.0\sim 95.0\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间, 峰值在 $45.0\sim 50.0\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , 不同月份回波移动速度存在差别, 春末(5月)、秋初(9月)回波具有较大的移动速度; 回波移动方向在 $120^\circ\sim 360^\circ$ 之间, 其中80.6%集中在 $210^\circ\sim 315^\circ$ 之间, 回波移向比较集中在西南、西和西北方向。(2) 降水过程回波的运动特征可以概括为四种形式: 简单直线型、复合直线型、复杂移动型和其他类型, 各种类型占的比例分别为69.6%、19.4%、25.2%和4.7%。这些研究可以为人工影响天气方案的设计和临近预报服务提供参考依据。

**关键词:** 新一代多普勒雷达, 回波移动速度, 回波移动方向, 回波移动规律

中图分类号: P412

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.10.013

## Analysis on the Moving Characteristics of Precipitation Echoes in Shandong Province

WANG Jun<sup>1</sup> GONG Dianli<sup>1</sup> ZHOU Liming<sup>1</sup> YANG Xiaoxia<sup>2</sup>

1 Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031

2 Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

**Abstract:** Using the data observed by the new generation Doppler weather radar in 4 years, the moving characteristics of radar echo are analyzed. It is found that: (1) the echo moving speeds are between  $10.0\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  to  $95.0\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , and the peak value is  $45.0\text{--}50.0\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . The echo moving speeds are different in different months. The radar echoes have larger movement speed in late spring (May) and early autumn (September). The echo moving directions are between  $120^\circ$  to  $360^\circ$ , of which 80.6% concentrates between  $210^\circ\text{--}315^\circ$ , and the moving directions mainly point to southwest, west and northwest; (2) The echo motion characteristics in the precipitation process can be summarized as four types: simple linear type, composite linear type, complex moving type and other types. The proportions of these types are 69.6%, 19.4%, 25.2% and 4.7% respectively. These studies can provide references for the scheme design of weather modification and nowcasting services.

**Key words:** new generation Doppler radar, echo moving speed, echo moving direction, echo moving characteristics

\* 国家科技支撑计划项目(2006BAC12B02)、国家自然科学基金项目(41275044)和山东省气象局重点课题(2012sdqxz07)共同资助  
2012年10月30日收稿; 2013年4月22日收修定稿  
第一作者: 王俊, 主要从事新一代多普勒雷达资料的开发应用和人工影响天气研究. Email: wangjun818@sohu.com

## 引 言

新一代多普勒天气雷达可以提供高时、空分辨率的产品资料,是监测和预警强对流天气的主要工具,通过风暴识别追踪和外推预报技术,雷达资料在国内外强对流天气短时临近预报系统中获得了广泛的应用(俞小鼎等,2005;张沛源等,2008;吕伟涛等,2009;郑永光等,2010;符式红等,2012)。

新一代多普勒雷达是人工影响天气决策指挥的主要工具之一。李红斌等(2005)基于雷达回波移向、移速的自动跟踪和云状的自动化识别,开发了基于模块化设计的数字雷达人工增雨作业指挥系统。黄毅梅等(2008)以雷达资料为主,结合卫星、数值模式产品和探空等各种资料,实现了人工增雨可播区域的自动选择。李红斌等(2010)利用多普勒雷达观测到的 37 个冰雹和强雷两个例,总结了冰雹云识别的雷达技术指标模型,给出了冰雹云类型判别的雷达防雹作业决策指标。吴汪毅等(2011)利用雷达组网拼图资料,精细化地分析了火箭人工增雨的作业参数。李德俊等(2011)则给出了适合恩施山区强冰雹和短时强降水天气的雷达临近预警指标。

分析雷达回波结构变化也是人工影响效果物理检验的重要方面,唐仁茂等(2010)针对对流云人工增雨作业效果的物理检验,提出了一种根据雷达回波参量自动选取对比云并进行效果分析的方法,研制了对流云人工增雨雷达效果分析软件。陈冰等(2003)利用新一代雷达产品分析增雨作业效果,发现作业后 10~20 min,作业云的基本反射率增大了 5 dBz 左右,并且最强反射率的面积比作业前增大 1 倍以上。人工催化后,催化云的雷达回波增强,持续时间也延长(唐仁茂等,2009;张瑞波等,2010)。而张蕾等(2009)分析表明,地面火箭大规模消云减雨作业后,雷达回波强度明显减弱,强回波面积逐渐减少,弱回波面积则在逐渐增加。

由于新一代多普勒天气雷达及其拼图产品(王红艳等,2009)可以监测大部分天气系统的生消、演变及结构特征,本文利用雷达观测资料,统计分析了回波的移向、移速,并分析了回波的总体演变特征,为临近预报和人工影响天气方案设计提供依据。

## 1 资料、方法说明

所用资料为 2006—2009 年 4—10 月济南新一

代多普勒雷达 CINRAD/SA 的产品资料,分析对象以尺度大于 100 km 的降水回波为主(大于 20 dBz 回波区域)。有两类回波没有分析,一种是大片孤立性的对流回波,济南周边 8 月前后在副热带高压外围易产生孤立性的对流回波群,这些对流云自东(或东南、东北)向西(或西北、西南)移动,强度一般低于 50 dBz,以  $\gamma$  中尺度为主,本文不对这类回波作分析;另外,有 11 次大范围弱降水回波比较均匀,很难定量追踪分析回波的移动速度和方向。

2006、2007、2008 和 2009 年分别有 46、55、64 和 52 个个例,一共是 217 个个例,积层混合云个例 171 个,其中水平尺度大于 400 km 的积层混合云降水个例 55 个,飚线、弓状回波等线状中尺度对流系统个例 46 个。

回波移动速度、方向的计算方法与 TREC 风(Smythe et al,1983;Tuttle et al,1999;陈明轩等,2007)的计算类似,以组合反射率产品为主,结合  $0.5^\circ$ 、 $1.5^\circ$  仰角的反射率因子产品,追踪相对比较稳定的回波的前沿、后沿或中心,根据两个时间段对应的位置坐标计算出回波移动速度、方向。

## 2 回波移动速度、方向统计分析

### 2.1 回波移动速度统计分析

回波移动速度在  $10.0 \sim 95.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  之间(图 1),跨度比较大,峰值在  $45.0 \sim 50.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,平均速度为  $51.2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,其中 64.7% 的回波移动速度位于  $30.0 \sim 60.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  之间,速度  $70.0 \sim 80.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  之间也有一个小峰值。

为了进一步分析回波移动速度的分布特征,按照月份来进行统计分析(图 1)。4 月有 18 个个例,回波移动速度在  $20.0 \sim 90.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  之间,主要集中在  $35.0 \sim 50.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  之间,峰值在  $45.0 \sim 50.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,平均速度为  $44.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,移速大于  $50.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的个例只占 22.2%;5 月有 28 个个例,回波移动速度在  $30.0 \sim 80.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  之间,比较集中,平均速度为  $55.9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。回波移速最大值位于  $75.0 \sim 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  段,且回波移速在此段内出现的频次最高;6 月有 47 个个例,回波移动速度在  $20.0 \sim 75.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  之间,比较集中,回波移速在  $45.0 \sim 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  有较高的出现频率(29.8%),平均速度为  $46.7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;7 月有 50 个

个例,是一年中个例出现最多的月份。回波移速在  $20.0 \sim 90.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  之间,其中  $50.0 \sim 60.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  有最大的出现频数,平均速度为  $49.7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 8月有40个个例,回波移速在  $10.0 \sim 85.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  之间,最大频数出现在  $35.0 \sim 40.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,平均速度为  $45.2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 9月有25个个例,回波移速在  $30.0 \sim 95.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  之间,  $55.0 \sim 60.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  之间是极值,但与其他区间出现的频数差别并不大,9月的回波具有比较大的移动速度,平均速度为

$61.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 10月的个例最少只有9个,回波也有比较大的移动速度,回波移速在  $30.0 \sim 95.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  之间,  $50.0 \sim 55.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  之间是极值,平均速度为  $58.7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

根据上面分析可以看出,4、6、8月回波移动速度偏小,8月具有最小的峰值速度和第二小的平均速度。而5、7、9和10月回波移动速度较大,9月有最大的平均速度和次大的峰值速度。总的来看,春末(5月)、秋初(9月)回波具有比较大的移动速度。

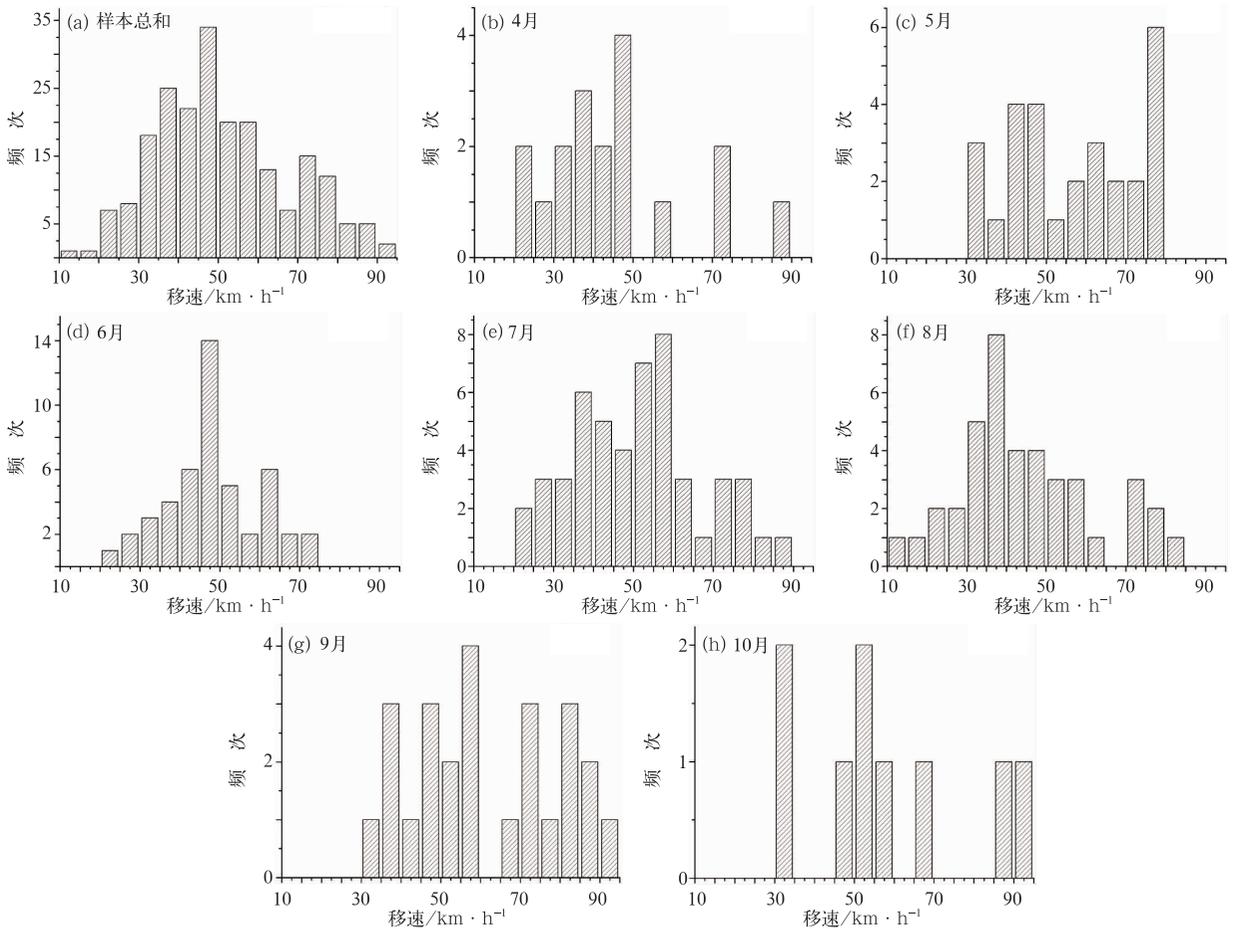


图1 回波移动速度(单位:  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )的频数分布

Fig. 1 Frequency distribution of echo moving speed (unit:  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )

(a) total number of samples, (b)–(h) April to October

4月,山东正是春季,受西风带环流影响,多移动性槽脊影响,大气比较干燥,降水较少。只有较深的低槽影响山东时,较强的偏南气流有利于水汽输送,才能产生降水。由于槽脊较深,移速较慢,产生的降水回波移速也较慢。6月副热带高压(以下简称副高)逐渐增强,控制华南沿海,西风带系统逐渐减弱,中高纬度冷性低涡活动频繁,系统深厚,移速

较慢,山东受低涡南部低槽和冷锋影响产生的降水较多,降水回波移动较慢。8月山东受副高控制,降水一般产生在副高边缘的切变线附近,由于副高较稳定,切变线维持时间较长,一般在切变线附近产生的降水回波稳定少动。

5月,南方暖湿气流和北方冷空气都较活跃,中纬度地区的湿度逐渐增大,降水逐渐增多,影响山东

省的主要降水系统为低槽冷锋和气旋,由于西风槽东移较快,由此产生的降水回波也移速较快。9 月是初秋季节,副高明显减弱南退东撤,山东主要受副高北部的西风带系统影响,冷空气影响增多,西风槽影响频繁且移速较快,由低槽冷锋产生的降水回波也具有较快的移速。

### 2.2 回波移动方向统计分析

回波移动方向是指回波的来向,按照 16 方位、间隔 22.5°进行统计。可以看出(图 2),回波移动方向在 123°~11°之间,主要集中在 213°~326°之间,占 81.6%,峰值在 258°~281°之间,即西方向。总的来看,回波移向比较集中在西南、西偏南、西、西偏北和西北方向。

逐月回波移动方向的分布特征表明(图 2),4 月回波移动方向出现在 168°~326°之间,极值出现在 281°~303°和 236°~258°之间,即西偏北和西偏南

两个方向;5 月回波移动方向出现在 168°~338°之间,峰值在 258°~281°之间,236°~258°之间也有较高的出现频率,与 4 月回波移向相比较,5 月回波移向峰值逐渐偏向南;6 月回波移向在 146°~348°之间,峰值在 258°~303°之间,约占 46.8%。西偏南、西南和西北三个方向出现的频率也比较大;7 月回波移向在 123°~348°之间,回波具有比较宽的移动方向,峰值在 213°~258°之间,即西南和西偏南方向。另外,南偏西、西和西偏北也有较高的出现频率,总的来看,7 月回波在比较宽的方向(191°~348°)出现高的频率;8 月回波移向在 146°~360°之间,其中峰值在 213°~236°之间,占 27.5%,236°~303°之间出现的频率也比较大。8 月回波的移向 75.0%集中在 213°~303°之间,回波移向明显比 7 月集中;9 月回波移向在 168°~303°之间,峰值在 258°~281°之间,本月回波移向 76.0%集中在 236°~281°之间,即为西和西南方向。与 8 月相比,峰值

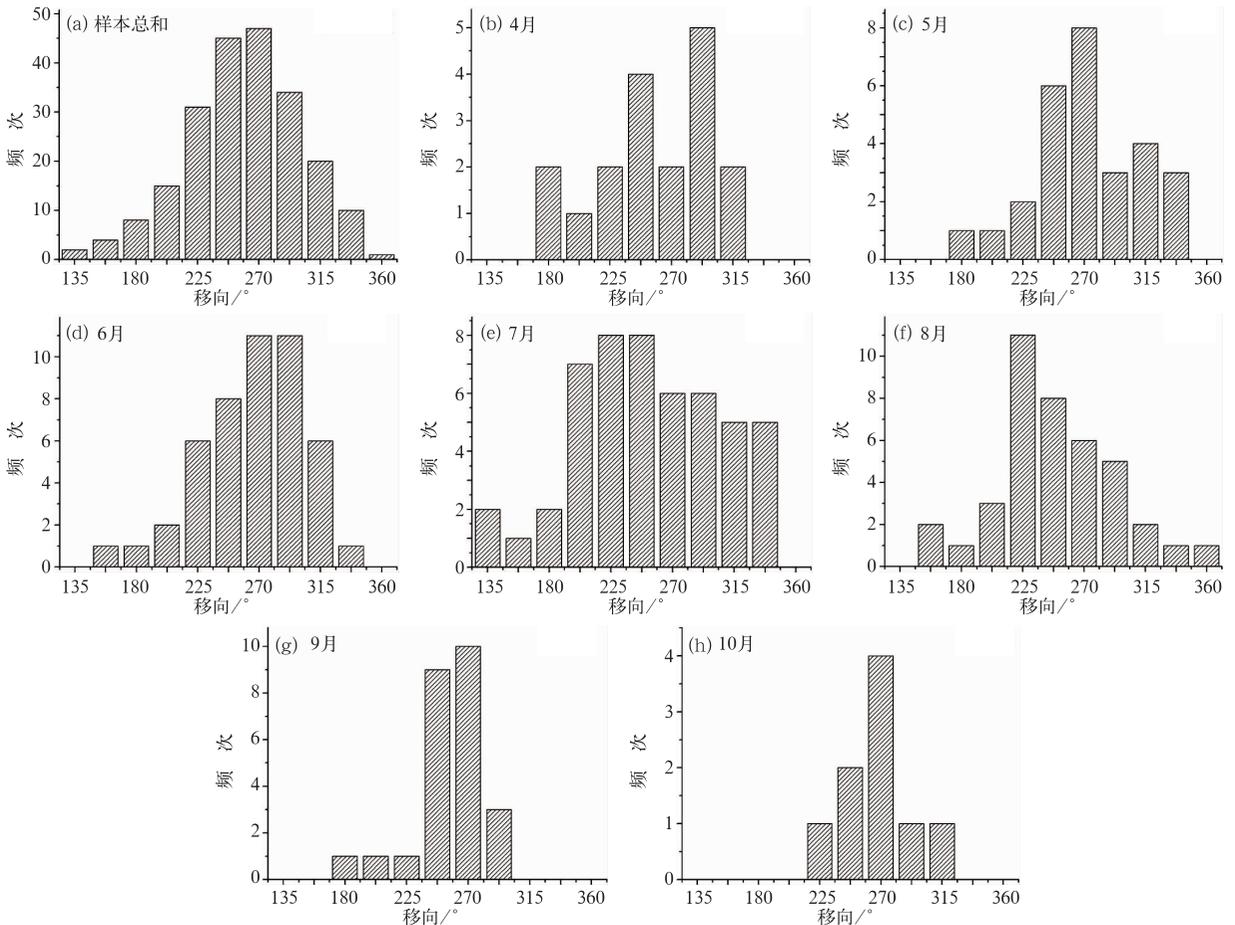


图 2 回波移动方向(单位:°)的频数分布

Fig. 2 Frequency distribution of echo moving direction (unit: °)

方向明显偏北;10月回波移向在 $213^{\circ}\sim 326^{\circ}$ 之间,具有最窄的移动方向,其中峰值在 $258^{\circ}\sim 281^{\circ}$ 之间。

不同月份回波移动方向统计分析表明,5、6、7和8月回波移向的峰值逐渐偏向南,而9和10月又逐渐偏向北。另外,6、7和8月回波具有比较宽的主要移向,其中7月分布范围最大,说明济南周围7月南北系统都可以产生明显影响。

5—8月西太平洋副高逐渐加强西伸北抬,副高边缘的偏南气流也随之加强北上,影响山东的降水系统由西风带环流中的低槽冷锋逐渐转为副高边缘的低涡、切变线、东风波等副热带系统。因此,回波移向的峰值由西逐渐偏向南。9—10月,副高南退东撤后,山东主要受西风带系统影响,冷空气影响增多,回波移向的峰值又逐渐偏向北。6—8月回波具有比较宽的移动方向,主要是由于6—8月山东受西风带系统和副热带系统的共同影响,西风带中冷空气势力偏强时,降水系统随北方冷空气自南向北或自西向东移动,若副热带系统中的暖湿气流较强时,降水回波随偏南气流自南向北移动。特别是7月,副高第二次北跳后,山东位于副高边缘,受西风带系统和副热带系统的共同影响,冷暖空气在山东省频繁交汇,造成暴雨和强降水天气,这一时期降水回波的移动路径主要有两种,一种是沿副高边缘的西南气流自西南向东北方向移动,另一种是随地面冷锋从西北向东南移动。

### 3 降水回波移动特征分析

上述分析只是针对某个时段回波移动速度和方向的统计结果,而对整个降水过程而言,回波的运动要复杂的多,回波的移动速度和方向并不是固定不变的。回波的运动与不同尺度天气系统的发展演变紧密联系,在天气系统不同的发展阶段,回波的运动也呈现不同的特征。下面进一步分析系统回波的运动特征,并根据降水过程回波的总体发展演变特征,将过程回波的运动概括为四种类型。

(1) 简单直线型:回波基本沿某一方向移动,但在不同时段移动速度和方向略有不同。在总个例中有133个简单直线型回波个例,约占总数的69.6%。2003年10月9—11日是一次典型的弱积层混合云降水天气过程,回波范围大、持续时间超过36h。10日13时(北京时,下同)左右回波自西南向移入,向东北方向移动,10日17:30前后回波移速 $45\text{ km}$

$\cdot\text{h}^{-1}$ ,移动方向 $197^{\circ}$ ;23:30前后回波移速 $52\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,移动方向 $192^{\circ}$ ;11日01时左右,回波移速 $46\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,移动方向 $199^{\circ}$ 。回波移动速度和方向略有变化,但差别不大,移动属于简单直线型。

(2) 复合直线型:回波也是基本沿固定方向移动,但回波的移动明显包括两种不同方向的运动。回波整体随天气系统(如低槽、冷锋等)沿某一方向移动,而其中的云团还沿另一方向移动,两种运动的合成形成回波的最终运动。另外,资料分析发现在简单直线型的后期,随着冷空气的侵入经常会转为复合直线型。统计表明一共有37个复合直线型回波个例,其中24个个例是由简单直线型转为复合直线型,复合直线型约占总数的19.4%。这种运动特征经常出现在低槽、冷锋影响下,回波首先产生在冷锋前部的西南气流中,回波在西南方向生成,逐渐向东北方向发展移动,且在发展移动的过程中,回波整体随西风槽或地面冷锋自西向东或自西北向东南移动。

(3) 复杂移动型:回波具有复杂的移动特征,如回波呈气旋式转动或者不同时段明显改变运动方向。复杂移动型共有49个个例,约占总数的25.2%。这种回波一般是受气旋或低涡影响,随高空气流的旋转而运动。2006年5月26日,受低涡影响,山东中北部出现一次强降水过程。降水回波11:00自山东西部进入,在向东北移动过程中逐渐发展加强,16时左右发展成南北长超过 $400.0\text{ km}$ 、宽 $20.0\sim 100.0\text{ km}$ 的弱对流云带,云带沿 $223^{\circ}$ 以 $45.9\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度移动。19时对流云带移过齐河雷达站,20时以后在云带的后部、雷达站附近开始有新的回波不断产生,27日01时前后在雷达站的东南方向有干冷空气侵入,回波开始出现向西北方向的运动,但回波移动缓慢,27日03时前后在雷达站南部又有回波生成,此时整个回波有气旋式转动。整个过程回波开始沿某一方向移动,为简单直线型,发展到一定阶段后回波呈气旋式转动,转变为复杂移动型。

(4) 其他类型:回波移动特征不明显,共有9个个例,约占4.7%。其中有几个个例回波开始较弱,到一定阶段迅速发展,形成大片较强回波,前面几种运动形式中回波也是不断发展、减弱,但都是局部迅速发展或者回波发展、减弱的比较缓慢,而这一类回波的特点是发展或减弱迅速并且范围比较大。

## 4 结 论

利用4年217个多普勒雷达观测资料,分析了降水回波的移动特征。

(1) 计算了回波移动速度、方向,结果表明回波移动速度在 $10.0\sim 95.0\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间,峰值在 $45.0\sim 50.0\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。不同月份回波移动速度存在差别,春末(5月)、秋初(9月)回波具有比较大的移动速度;回波移动方向在 $120^\circ\sim 360^\circ$ 之间,其中集中在 $210^\circ\sim 315^\circ$ 之间的占80.6%,回波移向比较集中在西南、西和西北方向。4月回波移动方向的峰值在西北( $285^\circ\sim 315^\circ$ ),5月峰值则向南转为西( $255^\circ\sim 285^\circ$ ),6、7和8月回波具有比较宽的移动方向,而峰值逐渐转为西南方向,9和10月峰值移向又逐渐向北。

回波移动速度和方向的变化与影响的天气系统及其季节变化密切相关。

(2) 总结降水过程回波的运动特征,将过程回波的运动概括为四种形式,简单直线型约占总数的69.6%,复合直线型约占总数的19.4%,复杂移动型约占总数的25.2%,其他类型约占4.7%。

目前,临近预报的基础是线性外推技术,回波运动的复杂性增加了临近预报的难度,在业务服务中,需要充分考虑复合直线型和复杂移动型回波的移动特点,做好强对流回波灾害落区预报,提高服务水平。

## 参考文献

陈冰,张深寿,冯晋勤,等.2003.新一代天气雷达产品在人工增雨作业中的应用.气象,29(1):23-26.

陈明轩,王迎春,俞小鼎.2007.交叉相关外推算法的改进及其在对流

临近预报中的应用.应用气象学报,18(5):690-701.

符式红,钟青,寿绍文.2012.对多普勒雷达集合交叉相关外推技术的构造与实例检验.气象,36(1):47-55.

黄毅梅,周毓荃,刘金华,等.2008.人工增雨可播区域自动选择方法研究.气象,34(7):108-113.

李德俊,唐仁茂,熊守权,等.2011.强冰雹和短时强降水天气雷达特征及临近预警.气象,37(4):474-480.

李红斌,方德贤,侯国成,等.2005.基于模块化设计的数字雷达人工增雨作业指挥系统.高原气象,24(3):456-464.

李红斌,何玉科,濮文耀,等.2010.多普勒雷达特征参数在人工防雹决策中的应用.气象,36(10):84-90.

吕伟涛,张义军,孟青,等.2009.雷电临近预警方法和系统研发.气象,35(5):10-17.

唐仁茂,向玉春,叶建元,等.2009.多种探测资料在人工增雨作业效果物理检验中的应用.气象,35(8):70-75.

唐仁茂,袁正腾,向玉春,等.2010.依据雷达回波自动选取对比云进行人工增雨效果检验的方法.气象,36(4):96-100.

王红艳,刘黎平,王改利,等.2009.多普勒天气雷达三维数字组网系统开发及应用.应用气象学报,20(2):214-224.

吴汪毅,杨光.2011.运用雷达组网拼图建立精细化人工增雨作业参数.气象,37(1):107-111.

俞小鼎,王迎春,陈明轩,等.2005.新一代天气雷达与强对流天气预报.高原气象,24(3):456-464.

张沛源,杨洪平,胡绍萍.2008.新一代天气雷达在临近预报和灾害性天气警报中的应用.气象,34(1):3-11.

张蕾,何晖,刘建忠,等.2009.北京2008年奥运会开幕式人工消减雨作业.气象,35(8):3-15.

张瑞波,刘丽君,钟小英,等.2010.利用新一代天气雷达资料分析飞机人工增雨作业效果.气象,36(2):70-75.

郑永光,张小玲,周庆亮,等.2010.强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战.气象,36(7):33-42.

Smythe G R, Zrnich D S. 1983. Correlation analysis of Doppler radar data and retrieval of the horizontal wind. J Climate Appl Meteor, 22:297-311.

Tuttle J, Gall R. 1999. A single-radar technique for estimating the winds in tropical cyclones. Bull Amer Meteor Soc, 80(4):653-667.