

用质心跟踪法预报强对流天气的试验研究

章卫龙 方炳兴

(空军气象中心,北京 100843)

提 要

利用1987—1991年6—8月间影响北京地区的13次西北路径强对流天气过程数字化雷达回波资料,用质心跟踪法,分别对不同强度等级廓线的飢线回波带整体,和选择其中对预报地区有影响的块(条)状回波,作移动客观外推预报试验及分析。结果表明,质心跟踪法对强对流雷达回波具有较好的客观外推预报能力。其中,有选择的块(条)状回波的移动外推预测效果比飢线回波带整体要好,而两者又均以不衰减的回波区外推预报效果最好,并用实际例子对其进行了验证。

关键词: 雷达回波 质心跟踪 飢线 外推预报

引 言

强对流是夏季引起灾害性天气的主要中尺度天气系统之一。由于其时空尺度小、生命史短,一般的常规预报方法无法解决其预报问题,因而对这些天气的监测和临近预报就显得十分迫切。Doswel^[1]在综合评述各种预报方法效果时指出,对于0—3小时的临近预报,效果最好的是简单外推法。随着计算机和通信技术的发展,以及数字化雷达的出现,不少人尝试利用数字化雷达回波资料作甚短期降水预报,取得了一定的效果^[2-4]。

本文利用1987—1991年6—8月间13次影响北京的西北路径强对流过程,共100幅数字化雷达回波资料,用质心跟踪法作0—3小时预报试验研究,取得了一些有益的结果。

1 资料处理和计算方法

1.1 资料处理

为便于数值计算,我们将雷达探测区域套上格距为6×6km的网格,格点上的数据从雷达PPI回波数据中提取,并且对各点上的数字化雷达回波资料进行等级分层,定标方法采用间隔10dBz为一层次,共分7层,各

层强度分级如表1所示。

表1 层次与dBz对应关系

层次	1	2	3	4	5	6	7
dBz值	<10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	>60

1.2 计算方法

回波质心的位置由下式确定^[5]

$$x = \frac{\sum_{i,j} m(i,j) \cdot x(i)}{\sum_{i,j} m(i,j)}$$
$$y = \frac{\sum_{i,j} m(i,j) \cdot y(j)}{\sum_{i,j} m(i,j)}$$

式中 $m(i,j)$ 为横坐标 i 、纵坐标 j 的网格上雷达回波反射率值。由于回波的质心位置是时间的函数,可用线性关系表示:

$$\hat{x}(t) = A_x + B_x \cdot t$$
$$\hat{y}(t) = A_y + B_y \cdot t \quad (1)$$

式中 A_x, A_y, B_x, B_y 分别为待定系数,可以根据两两相邻时刻雷达回波质心位置,通过最小二乘法求出。即要求:

$$F = \sum_{i=1}^n (|x_i - \hat{x}_i|^2 + |y_i - \hat{y}_i|^2) \quad (2)$$

为最小的情况下,函数 \hat{x}, \hat{y} 与观测值 x, y 达到最佳的拟合。式中 n 为回波采样的次数。根据微分学中的极值原理,有

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial A_x} &= 0, & \frac{\partial F}{\partial B_x} &= 0 \\ \frac{\partial F}{\partial A_y} &= 0, & \frac{\partial F}{\partial B_y} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入式(3),整理后求得 A_x, A_y, B_x, B_y 分别为

$$\begin{aligned} A_x &= \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i - B_x \sum_{i=1}^n t_i) \\ B_x &= \frac{n \sum_{i=1}^n t_i x_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n t_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \\ A_y &= \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i - B_y \sum_{i=1}^n t_i) \\ B_y &= \frac{n \sum_{i=1}^n t_i y_i - \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n t_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \end{aligned}$$

式中 x_i, y_i 为 t_i 时刻回波的质心位置。由此可以求出回波的移速为 $(B_x^2 + B_y^2)^{\frac{1}{2}}$, 移向为 $\text{tg}^{-1}(B_x/B_y)$ 。

2 试验结果及分析

2.1 试验1:对飊线回波带整体外推

在质心外推试验中,我们对每次强对流过程分别进行计算。首先算出两相邻时刻回波的质心,得到外推下一时次的质心位移矢量,亦即预报位移。其与该时次的质心实际位

移之差的绝对值就是外推质心与实际质心的空间误差。由于样本相邻两时次的时间间隔不一致,为了便于比较,假设移动回波的质心位置是时间的线性函数,将空间误差统一订正至外推时间间隔为半小时的误差。预报位移与实际位移的偏角,我们规定若实际质心在预报位移的右侧时为正(右偏),在左侧时为负(左偏)。

对飊线回波带整体分别就回波强度为 0dBz、30dBz、40dBz 和 50dBz 4 个等级的回波区廓线作质心外推试验,从试验统计结果(表 2)可看出,0dBz 廓线的飊线回波带质心外推误差最小,效果最好。而随着廓线强度的增加,飊线回波带质心外推角度平均偏差和平均半小时空间误差也随之增大,外推预报效果也越差。其原因可能和是否作整体处理有关。包围廓线的范围较大时,回波区的宏观特征相对稳定,外推效果就较好,而以较大回波强度为廓线的回波系统,回波变得孤立分散,范围较小,对流单体的随机性相对突出,导致外推效果降低。

对 0dBz 回波廓线的飊线回波统计结果进一步分析发现,右偏平均误差比总样本数的小,而左偏平均误差大于总样本数的平均误差。

表 2 飊线回波带移动外推预报误差统计结果

廓线强度等级	项目	样本数/个	角度平均偏差/度	角度标准差/度	角度变异系数	外推半小时空间误差/km	空间误差标准差/km	空间误差变异系数	百分率/%
0dBz	总体	74	38.26	27.29	0.71	18.83	14.85	0.79	100
	右偏	40	34.35	26.70	0.78	16.76	13.22	0.79	54.1
	左偏	34	-42.85	27.26	0.64	21.27	16.23	0.76	45.9
30dBz	总体	74	41.24	34.57	0.84	23.35	19.75	0.85	100
	右偏	36	41.42	36.61	0.79	22.03	16.71	0.76	48.6
	左偏	38	-41.08	36.32	0.88	24.60	22.17	0.90	51.4
40dBz	总体	74	47.93	39.98	0.83	27.86	21.27	0.76	100
	右偏	38	46.47	39.42	0.85	24.81	19.36	0.78	51.4
	左偏	36	-49.47	40.52	0.82	31.08	22.69	0.73	48.6
50dBz	总体	70	66.61	41.20	0.62	51.73	60.15	1.16	100
	右偏	31	69.32	40.79	0.59	49.92	50.73	1.02	44.3
	左偏	39	-64.46	41.40	0.64	53.17	66.67	1.25	55.7

半小时空间误差 < 20km 的占样本数 64%。概率峰值区出现在 5—10km 之间,占

样本数 24.3%，而空间误差 >45km 的概率极小，仅占样本数的 5.5% (图 1)。

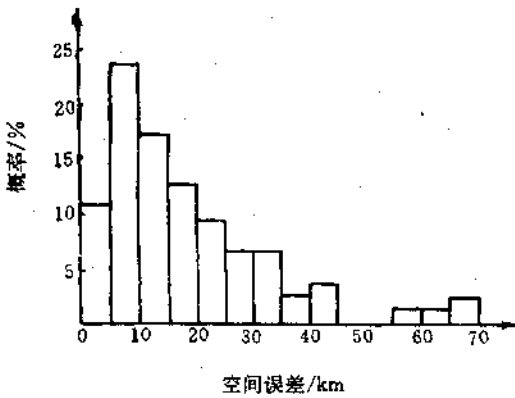


图 1 飢线回波带半小时空间误差概率分布

角度偏差集中在 -20° — 30° 之间的占样本数 40%，其中，角度偏差概率最大峰值区出现在正偏角区的 10° — 20° 之间。此外，偏角在 -30° — 70° 之间的样本数概率为 28.4%，是质心外推预报偏角的另一个集中区，其中， -30° — 50° 为一个概率次峰值区 (图 2)。

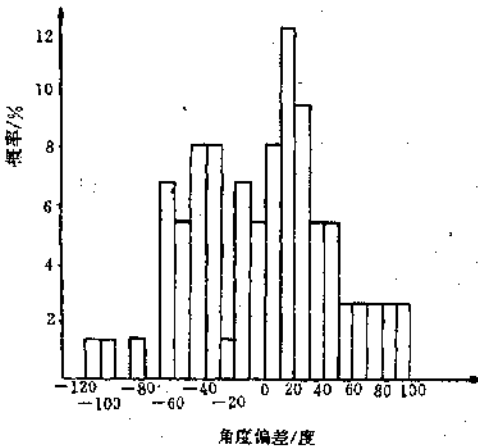


图 2 飢线回波带角度偏差概率分布

由于强度分别为 30dBz、40dBz、50dBz 的飢线回波区其质心线性外推预报误差比 0dBz 廓线回波区的大，预报效果差，本文就不再对其进行详细的分析。

2.2 试验 2:对飢线回波带作选择性外推

为进一步改进质心客观外推预报的效果，我们分析了上述数字化雷达回波资料后，进行有选择的外推。选择的条件是对本区有影响的回波并考虑了回波的相对完整性，即块状或条状回波。得到对预报地区有影响的回波共 97 个时次的资料，扣除每个强对流过程用于外推的初始两个时次的样本外，共得到 71 个外推样本。通过大量的计算和比较表明，对回波先作选择，再作外推，是十分必要的，其质心外推效果与试验 1 相比有明显改进。

表 3 是影响北京地区的块状或条状回波质心外推的统计结果。由表可见，回波区廓线强度为 0dBz 的误差最小，外推效果最好，与试验 1 相比，外推误差明显减小。表明对雷达回波作选择外推可以显著改进预报效果。因此，结合预报员的经验，通过人工干预，选择对预报地区有影响且较为完整的回波，滤去不重要的零散回波，是提高质心外推预报效果的重要手段。

由表 3 还可看出，回波强度廓线分别为 30dBz、40dBz、50dBz 的回波区质心外推误差越来越大，其原因可能是由于只选择其中各等级以上的回波区外推，使得回波变为由孤立分散的单体构成的回波群或零散回波，且外推回波区廓线强度值愈大，回波变得愈分散，因而外推效果越差。

对 0dBz 廓线的块状或条状回波统计结果进一步分析可以看出，出现右偏的概率高于左偏，右偏平均误差大于左偏。这一结果与试验 1 正好相反，产生这种现象的原因目前尚不清楚。

0dBz 廓线的块(条)状回波半小时空间误差概率最大峰值区位于 5—10km 之间，占样本数的 32.4% (图 3)。在 15—20km 间还出现另一个概率峰值区，半小时空间误差绝大多数 <20km，占样本数 70.3%；偏差小于 10km 的样本达半数以上，为 53.3%。与试验

1相比,两者概率分布相似,只是试验2的空
间误差概率集中在10km以内,预报效果比
试验1有明显改进。

表3 块(条)状回波移动外推预报误差统计结果

廓线强度等级	项目	样本数/个	角度平均偏差/度	角度标准差/度	角度变异系数	外推半小时空间误差/km	空间误差标准差/km	空间误差变异系数	百分率/%
0dBz	总体	71	27.70	25.58	0.92	12.72	9.76	0.77	100
	右偏	41	28.41	22.37	0.79	13.01	9.66	0.74	57.7
	左偏	30	-26.73	29.37	1.10	12.32	9.88	0.80	42.3
30dBz	总体	71	33.52	29.31	0.87	19.45	18.57	0.96	100
	右偏	43	32.02	28.25	0.88	18.11	17.75	0.98	60.6
	左偏	28	-35.82	30.71	0.86	21.50	19.59	0.91	39.4
40dBz	总体	67	42.61	35.26	0.83	24.66	17.55	0.71	100
	右偏	37	42.59	34.18	0.80	23.39	16.55	0.71	55.2
	左偏	30	-42.63	36.54	0.86	26.23	18.59	0.71	44.8
50dBz	总体	60	59.10	37.25	0.63	34.87	27.98	0.80	100
	右偏	26	69.59	37.62	0.54	41.62	35.79	0.86	43.3
	左偏	34	-51.09	34.91	0.68	29.72	18.47	0.62	56.7

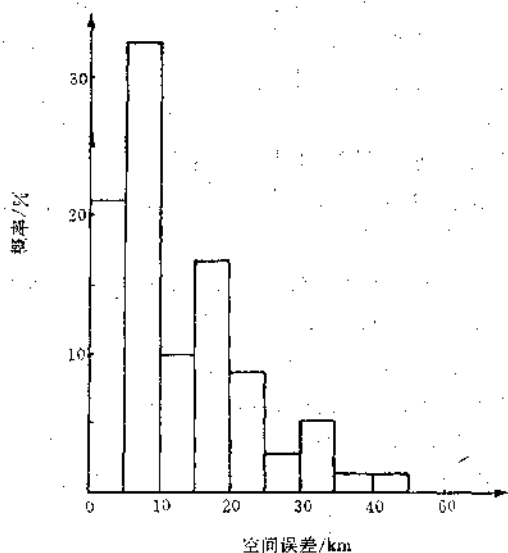


图3 块(条)状回波半小时空间误差概率分布

角度偏差概率最大峰值区出现在-10—0°之间(图4),占样本数15.5%。多数样本角度偏差集中在-20—30°之间,占样本数59.3%,比试验1有明显增加。此外,在40—50°之间出现次峰值区,占样本数11.3%。

3 外推时间长短对误差的影响

上述试验结果,没有考虑外推时间长短对误差的影响,为此,我们对上述雷达回波资料,按外推时间间隔均小于3小时的所有可

能组合,得到爬线回波带样本674个,块(条)状回波样本584个。下面就外推时间长短对回波移动预报误差的影响进行试验分析。

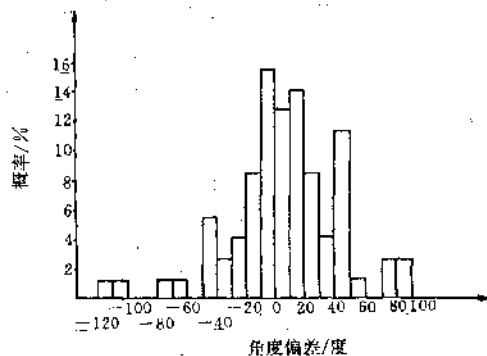


图4 块(条)状回波角度偏差概率分布

图5为误差与外推预报时间间隔的统计关系,横坐标为外推预报时间间隔 Δt ,纵坐标为 Δt (± 5 分钟)时移动外推预报样本的平均误差。由图5a可见,外推预报的空间误差总体趋势是随时间增加而加大,且块状回波的空间误差小于爬线回波带,这与上文结论一致。图中110—140分钟的误差出现波动,其原因是在该时段的样本数较少所引起的。两者外推1小时以内的误差均较小,外推效果较好。其中,爬线回波带1小时空间误差为22.9km,块(条)状回波1小时空间误差为

18.1km。当外推时间大于1小时时,空间误差随外推时间增长而迅速增大。

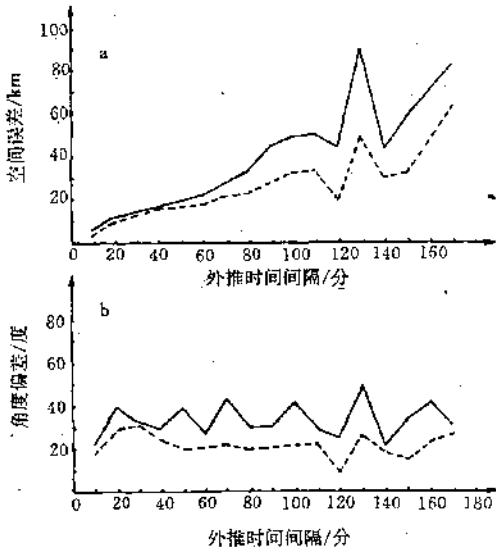


图5 误差随外推时间的分布

实线:飚线回波带;虚线:块(条)状回波

由图5b可见,块状回波的外推预报角度偏差比飚线回波带要小,与上文的结果吻合。两者的角度偏差随外推时间的变化与空间误差不同。其中,块状回波的角度偏差在外推10—30分钟时,是随外推时间增长而加大,在40—110分钟之间,角度偏差基本上都维持在21°附近,以后随外推时间增加,在10—30°之间波动。而飚线回波带角度偏差随外推时间增加在20—50°之间呈波动变化。需要说明,这里讨论的角度偏差是取其绝对值,没有分左、右偏现象。

4 实例及在预报中值得注意的几个问题

4.1 实例1

对1991年6月4日强对流过程飚线回波带整体作外推预报。当日傍晚前后,北京地区出现了一次强对流天气过程,受其影响,西郊机场17时50分出现 $21\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西北大风,南苑机场18时13分出现 $19\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的偏北大风。从这次过程的雷达回波演变动态以及用质心跟踪法作出的对应时次的回波带预报位置图(图略)可以看出,预报的回波区及

强中心与实际观测的回波区及强中心位置总体较为一致。

预报的质心位置除16时15分与实际质心位置相差较大外,其它时次较为接近,并分布在实际质心的移动路径两侧附近,其路径方向与实际质心移动方向趋势是一致的(图略)。表4是各时次实际质心与预报质心的角度偏差和空间误差值,可以看出,16时15分空间误差最大。造成这一现象的原因是由于前一时次的实际回波西南方向有回波群新生,而以后各时次的实际回波没有发生这种突变现象,因而质心外推的误差就相对较小。

表4 1991年6月4日影响北京地区的飚线回波带质心外推误差值

时 间	时间间隔/分	角度偏差/度	空间误差/km	半小时空间误差/km
15:00	0			
15:31	31			
16:15	44	-53	96.61	65.19
16:30	15	25	4.34	8.69
16:57	17	-65	15.25	16.94
17:20	23	-32	6.31	8.23
17:42	22	21	7.58	10.34
18:12	30	-35	13.90	13.97

需要指出,强天气出现地点与质心无直接关系,例如,南苑18时13分出现大风天气,而此时回波的质心与南苑相距60km左右,强天气是出现在回波强中心附近(图略)。

4.2 实例2

对1991年6月4日强对流过程回波作选择外推预报。我们选择上例中影响北京地区的一块相对较完整的块状回波作质心外推预报,预报的回波区和强中心与实际的回波位置十分吻合(图略)。

回波的预报质心与实际质心十分接近,且两者的移动路径较为一致(图6)。表5是实际质心与预报质心的误差值,与表4相比较,其误差明显减小。由此可见,在作质心外推时,对回波进行有选择地外推是十分重要的。

表5 1991年6月4日影响北京地区的块状回波质心外推误差值

时间	时间间隔/分	角度偏差/度	空间误差/km	半小时空间误差/km
15:00	0			
15:31	31			
16:15	44	8	2.61	1.78
16:30	15	-23	5.58	11.15
16:57	17	8	4.76	5.28
17:20	23	-2	0.98	1.27
17:42	22	5	4.95	6.74
18:12	30	19	6.61	6.61

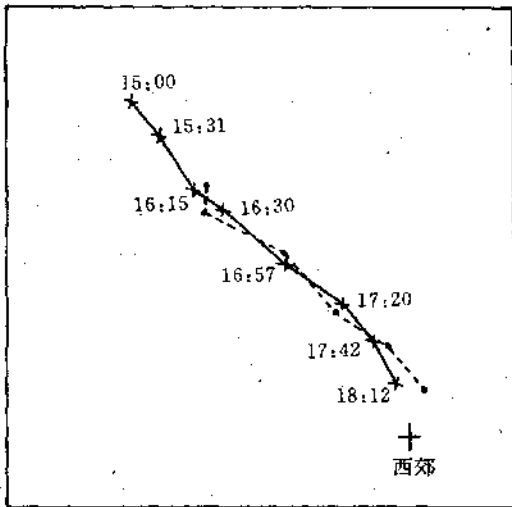


图6 质心移动路径
叉为实际质心,圆点为预报的质心

4.3 在预报中值得注意的几个问题

4.3.1 质心是对流回波系统在几何上的一个特征点,而不是它的最强点或强中心。

4.3.2 外推回波的质心不是根本目的,只是一种手段,其方法的最终目的是通过质心预报,寻求回波系统的位置,特别是对预报区影响最大的强回波的位置。

4.3.3 质心法外推的回波强中心与实际回波的强中心较为接近,但误差是存在的。因而作单站强对流预报时,关键是要看预报的回波系统是否能影响所关心的测站,以及强中心与测站的相对位置,结合其它气象资料和雷达回波高显资料,最终作出有无强对流天

气的预报。

4.3.4 预报的回波区形状和结构是前一相邻时次实际观测的雷达回波,由于回波系统在移动过程中是变化的,因而,与实际回波会有差别,有时差别较大。如果预报的时间间隔愈长,回波的移动、形状和结构变化也愈大,因此,与实际的回波差别也就愈大。

5 结论

5.1 质心跟踪法对强对流雷达回波的移动有较强的客观外推预报能力。通过质心法外推得到的回波区及其中的强中心预报位置与实际回波较为接近,因此,质心跟踪法是强对流临近预报的一种有效的客观定量外推方法。

5.2 在用质心跟踪法外推回波移动时,回波的选择对其预报效果有较大影响。质心跟踪法对强度强、形状较为完整的块(条)状回波外推预报效果较好,对匙线回波带整体外推效果相对要差一些,而两者又均以不衰减的回波区外推预报效果最好。

5.3 外推时间长短对预报的空间误差有较大的影响,空间误差随外推时间间隔增长而加大。因此,外推时间不宜过长,以1小时以内的外推效果较为理想。

参考文献

- 1 Doswell, C. A. III, Short-range forecasting, pp. 676-719 in mesoscale meteorology and forecasting ED. P. SRay. American Meteorological Society, 1986.
- 2 G. L. Austin and A. Bellon, The use of digital weather radar records for short-term precipitation forecasting, Quart. J. R. Met. Soc., 1974, 100, 658-664.
- 3 Zawadzki, I. I., Statistical properties of precipitation patterns, J. Appl. Met., 1973, 12, 459-472.
- 4 Borclay, P. A. K. E. Wilk, Severe thunderstorm radar echo motion and related weather events hazardous to aviation operations. ESSA Tech. Memo. ERLTM-NSSL 1970, 46-63.
- 5 杨国祥, 中尺度天气预报, 空军气象学院学报, 1992, 13 (3).

(下转第56页)

(上接第 18 页)

The Study of Severe Convection Weather Forecast by the Method of Tracking Echo Centroids

Zhang Weilong Fang Bingxing

(Air Force Meteorology Center, Beijing 100843)

Abstract

By using digital radar echo data of 13 severe convection affecting Beijing region from June to August during 1987—1991, objective movement forecasting of the radar echo is derived for squall lines entirety and piece echo affecting forecasting region of different intensity with the method of tracking echo centroids. The results show that the method of tracking echo centroids has a fairly good capability of linear objective forecasting to radar echo of the severe convection. The effect of the piece echo movement forecasting is better than that of squall lines entirety, but the movement forecasting effect of non-attenuation echo is the best of them. At last real examples are verified.

Key Words: digital radar echo tracking echo centroid squall line linear forecasting