

多卜勒天气雷达预报强对流回波移动模式

胡 雯* 张培昌 顾松山 王春茹

(南京气象学院)

摘要 采用多卜勒天气雷达资料,在 IBM-PC 系列微机上建立强对流天气回波 0—2 小时临近预报模式。该模式先对 PPI 图象数据进行预处理,选出一群有预报意义的强回波块,提取它们的一组特征值,然后用模糊聚类法进行分类,并用路径外推法作临近预报,获得比较客观的预报结果。

关键词 临近预报,模糊聚类

中尺度对流系统常造成破坏性的剧烈天气,给人民生命财产和国民经济建设带来严重威胁和灾害。因此,对于灾害性天气临近预报方法的研究,已成为目前世界气象界关注的重要问题之一。早在 60、70 年代,国外就开始用数字化雷达资料对强对流天气路径作临近预报^[1-3],并逐步形成各自的预报方法。我国随着天气雷达数字化处理系统的建立,也不断提出了各种跟踪、识别和预报回波位置的方法^[4-5]。为了能在微机上作出实时预报,邓勇等引入了逐步聚类法对强对流回波移动路径作客观外推预报^[6],其不足之处是强度等级及聚类因子太少,用普通聚类进行划分又过于机械、简单。

本文在文献[6]的基础上采用模糊聚类中的 ISODATA 法,综合考虑多种因子对样本分类的影响,并给出聚类后各类中心特征信息。在聚类过程中引入多卜勒天气雷达所特有的降水粒子径向速度 V 作为一个聚类因子,以使处在不同位置 and 不同环境流场中的回波块的分类更为合理。在客观外推过程中,引进回波强度的增强、减弱指标,修正外推结果以提高预报准确性。

1 模式组成

整个模式由图象预处理、特征提取、聚类分析、路径外推 4 个主要模块组成。

1.1 图象预处理模块

它的作用有:

(1) 消除测站中心附近的非气象回波。取某一选定的半径 r , 设测站坐标为 (x_0, y_0) , 查询点坐标为 (x, y) , 把满足 $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \leq r^2$ 各像素点值置 0, 就可消除测站附近的地物回波。

(2) 滤波(主要是对噪声的滤波)。对于强度图,采用邻域平均法。设一幅像素点为 $N \times N$ 的图象,其强度值为 $f(x, y)$, 经平滑后的图象强度为 $g(x, y)$; 在每点 (x, y) 上的灰度级由包含点 (x, y) 在内的预定邻域⑤中 M 个像素点灰度级的平均值决定。即

* 现安徽省气象局工作

收稿日期:1992-05-14

$$g(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{M} \sum_{(m, n) \in S} f(m, n), & \left| f(x, y) - \frac{1}{M} \sum_{(m, n) \in S} f(m, n) \right| \geq T \\ f(x, y) & , \text{其他} \end{cases}$$

其中, $x, y = 0, 1, 2, \dots, N-1$, S 是点 (x, y) 邻域中各点坐标 (m, n) 的集合 (不包括点 (x, y)), M 是集合 S 内坐标点的总数, T 为一规定的非负阈值。本文取 $M=8$, 则 $S = \{(x-1, y-1), (x, y-1), (x+1, y-1), (x-1, y), (x+1, y), (x-1, y+1), (x, y+1), (x+1, y+1)\}$, $T=1$ 。对于速度图采用中值滤波, 在一维形式下中值滤波器为一个含有奇数个像素的滑动窗口, 窗口正中那个像素的像素值用窗口内各像素值按大小排列后的中间值代替, 这样就可滤去存在于窗口中的单一噪声类峰值。本文采用 3×3 的窗口来实现速度图的滤波。

1.2 特征提取模块

用规定的强度阈值和面积阈值剔除较弱和较小的回波, 这样屏幕上只剩下一些孤立的强回波块, 通过对其逐个跟踪识别, 提取出各回波块的一组特征值: 特征强度 I_i 、特征面积 A_i 、特征径向速度 V_i 、特征中心坐标 (x_i, y_i) , 具体处理步骤为:

(1) 通过对屏幕逐行扫描, 用规定强度阈值对各像素点进行标识, 以读出各强回波块。

(2) 剔除小于阈值面积的回波块后, 再统计剩下的各强回波块 (称为特征回波) 所包含的像素点数目作为特征面积 A 。为了简便和具有强度的代表性, 以每回波块中强度最大值与最小值的算术平均值作为该回波块的特征强度 I 。

(3) 沿特征回波边界上各点按式 $x_i = \sum_{j=1}^N x_j / N$, $y_i = \sum_{j=1}^N y_j / N$, $V_i = \sum_{j=1}^N V_j / N$ 分别求出每块回波的特征坐标 (x_i, y_i) 及特征速度 V_i 。 N 为回波块边界上的像素点数目。

1.3 聚类分析模块

经图象初步处理和阈值筛选后一般仍会有较多的强回波块, 若一一进行处理, 计算量大, 预报时效跟不上。另外, 有些回波块变化快, 一一处理也会产生前后失配造成预报失败。本文将每一回波块的一组特征值作为“样本值”, 将“相似”回波块用聚类法归类。就可大大节省机时。

对回波块进行分类, 带有一定的模糊性, 某块回波从某些特性考虑应属于某一类, 而从另一些特征考虑又应属于另一类。因此, 用模糊聚类分析方法进行分类更为自然。分类的目的要以类的特征值聚类中心的信息, 代表类内各回波块的特征, 以能用较少的计算量对回波移动路径作客观外推。因此, 选用模糊划分方法中的模糊 ISODTA 算法^[7]。

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为一有限集, X 的模糊 c -划分是 X 上 c 个模糊子集

$$\{A_i | i = 1, 2, \dots, c\}, 2 \leq c \leq n$$

它要求满足

$$\sum_{i=1}^c \mu_{A_i}(x_i) = 1, \forall x$$

其中 μ_{A_i} 表示 x_i 属于 A_i 类的程度。这样的划分可以用一个 $c \times n$ 模糊矩阵 $U = (u_{ik})$ 表示, 这里的 $u_{ik} = \mu_{A_i}(x_k)$ 。

设 V_{α} 是 $c \times n$ 矩阵的集合, 则 X 的模糊 c -划分空间是 V_{α} 中的集合

$$M_f \triangleq \left\{ U \in V_{\alpha} \mid u_{ik} \in [0, 1], \forall i, \forall k; \sum_{i=1}^c u_{ik} = 1, \forall k; 0 < \sum_{k=1}^n u_{ik} < n, \forall i \right\}$$

显然, 模糊 c -划分是普通 c -划分的推广。为方便, 一般把上述 c -划分空间定义中要求 $0 <$

$\sum_{k=1}^n u_{ik} < n, \forall i$ 放宽为 $0 \leq \sum_{k=1}^n u_{ik} \leq n, \forall i$ 。这样的划分空间称为退化的模糊 c -划分空间。

设有 c 个聚类中心 $V_1, V_2, \dots, V_c$, 它是一个集合: $V = \{V_1, V_2, \dots, V_c\}$ 。取样本 x_i 与聚类中心

$V_i (i=1, 2, \dots, c)$ 的欧氏距离为

$$d_{ik} = \|x_k - V_i\| = \left[\sum_{j=1}^m (x_{kj} - V_{ij})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

下标 j 表示指标(即特征值的序号), x_{kj} 表示第 k 个样本的第 j 个指标值, V_{ij} 也作类似理解。所有各类的样本到它们各自对应的聚类中心距离平方和可写为

$$J(U, V) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c u_{ik} (d_{ik})^2 = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c u_{ik} \left[\sum_{j=1}^m (x_{kj} - V_{ij})^2 \right]$$

式中乘 u_{ik} 表示是带权的距离平方和。为了加强 x_k 属于各类的从属程度的对比度, 一般还把上式写成如下形式

$$J(U, V) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (u_{ik})^r \|x_k - V_i\|^2$$

其中 $r \geq 1$ (是待定参数)。一个对 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 理想的分类, 就是要寻找这样的一个分类矩阵 U , 它能使上述泛函为极小。

模糊 ISODATA 算法的步骤为:

- (1) 取定 $c: 2 \leq c \leq n$, 取初始划分矩阵 $U^{(0)} \in M_{fc}$, 逐步迭代;
- (2) 用(1)式计算聚类中心 $V = \{V_i^{(0)}\}$

$$V_i^{(l)} = \frac{\sum_{k=1}^n (u_{ik}^{(l)})^r x_k}{\sum_{k=1}^n (u_{ik}^{(l)})^r} \quad (1)$$

其中 $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{im})$, $i=1, 2, \dots, c$; $x_k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{km})$, $k=1, 2, \dots, n$; $l=0, 1, 2, \dots$ 。

- (3) 用(2)式修正 $U^{(l)}$

$$u_{ik}^{(l+1)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^c \left(\frac{\|x_k - V_i\|}{\|x_k - V_i\|} \right)^{\frac{1}{r-1}}}, \forall i, \forall k \quad (2)$$

下标 i 与 k 都是聚类中心的标号, 取 $r=2$ 。

- (4) 用一个矩阵范数 $\|\cdot\|$ 比较 $U^{(l)}$ 与 $U^{(l+1)}$, 对于取定的 $\varepsilon > 0$ (取 $\varepsilon=0.001$) 若 $\|U^{(l+1)} - U^{(l)}\| \leq \varepsilon$ 或 $\max\{|u_{ik}^{(l+1)} - u_{ik}^{(l)}|\} \leq \varepsilon$ 则停止迭代; 否则以 $u_{ik}^{(l+1)}$ 代入(1)式继续迭代。

由以上算法获得的 U 与 V , 为最佳模糊 c -划分的划分矩阵和聚类中心。

本模块选择回波块特征中心坐标 x_k, y_k 及特征径向速度 V_k 这三个因子作为聚类因子。由于各特征值是根据不同的单位测量得到, 因此在聚类之前还应先作标准化处理, 使之在聚类过程中权重一致。设 x'_{kj} 为标准化后第 k 块回波的第 j 个特征值, 则因子的标准化公式为

$$x'_{kj} = (x_{kj} - x_{j\min}) / (x_{j\max} - x_{j\min})$$

其中 $k=1, 2, \dots, n$ 为回波块序号; $j=1, 2, \dots, m$ 为特征类别(本文取 $m=3$), $x_{j\min}$ 及 $x_{j\max}$ 分别为 n 块回波中第 j 个特征的最小值和最大值。

分类数 c , 根据屏幕回波图象由经验判断取定。在 n, c 给定条件下, 按回波块序号依次将各回波块均匀地分到 c 类中去, 并假定其隶属度为 1, 这样就形成初始划分矩阵 $U_{in}^{(0)}$ 。这样做主要是考虑预报的时效性。聚类完成后对标准化的因子进行复原。

1.4 路径外推模块

- (1) 引导气流法 我们选取测站附近最靠近预报时间的 500hPa 高空风资料作为引导气

流,则回波移向、移速的外推公式为

$$\begin{cases} D_1(i) = D_w - 180^\circ \\ V_1(i) = \beta \times V_w \end{cases} \quad (3)$$

其中 D_w 、 V_w 为高空风向、风速; $D_1(i)$ 、 $V_1(i)$ 为回波移向、移速; β 为移速修正系数(一般取 0.7)。因回波移向是指去向(与风向相反),故(3)式中将 D_w 减去 180° 。

(2)线性外推法 设 $(x_{i1}(i), y_{i1}(i))$ 、 $(x_{i2}(i), y_{i2}(i))$ 分别代表 t_1 和 t_2 时刻第 i 类回波的特征位置,则回波的位移公式为

$$\begin{cases} D_2(i) = \arctg \left[\frac{y_{i2}(i) - y_{i1}(i)}{x_{i2}(i) - x_{i1}(i)} \right] \\ V_2(i) = \frac{\{[x_{i2}(i) - x_{i1}(i)]^2 + [y_{i2}(i) - y_{i1}(i)]^2\}^{\frac{1}{2}}}{t_2 - t_1} \end{cases} \quad (4)$$

用两幅回波图作线性外推,首先要解决两幅图中回波“类”的匹配(本文采用主矢量法^[6])。具体步骤为:①求出 t_1 、 t_2 时刻各强回波“类”的特征位置矩阵 P_1 、 P_2 ,即

$$P_1 = \begin{bmatrix} (x_{11}, y_{11}) \\ (x_{12}, y_{12}) \\ \vdots \\ (x_{1q}, y_{1q}) \end{bmatrix}, \quad P_2 = \begin{bmatrix} (x_{21}, y_{21}) \\ (x_{22}, y_{22}) \\ \vdots \\ (x_{2s}, y_{2s}) \end{bmatrix}$$

其中下标 1、2 分别表示 t_1 和 t_2 时刻, q 与 s 分别表示 t_1 和 t_2 时刻的回波类别数,矩阵元素表示某时刻、某类回波的特征位置。

②由(3)式算出各类回波经 $\Delta t = t_2 - t_1$ 时段的位移量

$$\Delta x(i) = V_1(i) \cdot \Delta t \cdot \cos(D_w - 270^\circ)$$

$$\Delta y(i) = V_1(i) \cdot \Delta t \cdot \sin(D_w - 270^\circ)$$

D_w 减去 270° (因除风向与回波移向差 180° 外,屏幕直角坐标上角度从正北算起,极坐标上角度从正东算起,两者又差 90°)。于是可由

$$\begin{cases} x_{0i} = x_{i1}(i) + \Delta x(i) \\ y_{0i} = y_{i1}(i) + \Delta y(i) \end{cases}$$

计算出主矢量矩阵 P_0

$$P_0 = \begin{bmatrix} (x_{01}, y_{01}) \\ (x_{02}, y_{02}) \\ \vdots \\ (x_{0q}, y_{0q}) \end{bmatrix}$$

③计算 P_0 、 P_2 两矩阵各处元素之间的交叉欧氏距离阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1q} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{q1} & r_{q2} & \cdots & r_{qq} \end{bmatrix}$$

其中 $r_{ij} = [(x_{2i} - x_{0j})^2 + (y_{2i} - y_{0j})^2]^{\frac{1}{2}}$ 。对 R 矩阵的每列元素逐个扫描,取其中最小的元素保持不变,其余元素置零。再对 R 阵中每行元素逐个扫描,若某行中有两个以上非零元素,则仅保留较小者,其余元素置零。经过上述处理后便得到 t_1 、 t_2 两个时刻回波“类”的匹配矩阵 R^*

$$R_{s \times q}^* = \begin{cases} r_{ij} > 0 & t_1 \text{ 时刻第 } j \text{ 类回波与 } t_2 \text{ 时刻第 } i \text{ 类回波相匹配时} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

当 R^* 阵中出现某行或某列元素全为零时,表示有失配的回波“类”(对应回波消失或新生的情况)。对新生的回波“类”可直接用引导气流法外推。匹配后,就可用(4)式结果作线性外推预报。

2 个例试验

选用国家气象局气象科学院,1989年5月31日15:40用10cm天气多卜勒雷达探测到的一次冷锋降水过程的回波图象资料进行试验,并取 x_i 、 y_i 、 V_i 3个特征量作为聚类因子。图1是15:40的回波彩色分层图象示意图,用引导气流法对其作1小时的外推预报(见表1)。图2是16:40的实测回波示意图。对比表1和图2可以看出,两者吻合较好。因为在15:40—16:40,整个回波系统的强度及结构等没有显著变化,故引导气流法可行。为减少数据传输量,屏幕上仅显示各特征回波的落点位置。

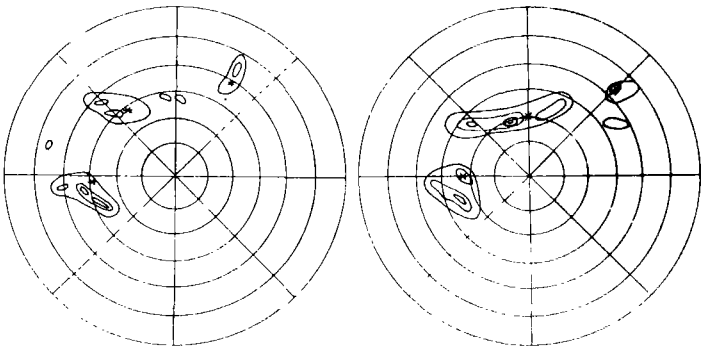


图1

图2

表1 引导气流法外推预报结果

类号	x 坐标 (象素点数)	y 坐标 (象素点数)	移向 (°)	移速 (km/h)	距离 (km)	方位 (°)
1	340	110	104	40	205	38
2	200	155	104	40	117	335
3	154	254	104	40	109	261

再将15:40和16:40两幅回波图象(即图1和图2),通过类的匹配等步骤求出各类回波的移向、移速,并以此作下1小时的线性外推,获得17:30的预报结果(表2),与17:30的实况(见图3)比较可以发现,回波系统总的移动趋势与实况相符,但有些回波块的外推结果与实况有一定偏差,这可能由于回波系统内部各类中心位置在不同时刻存在相对偏移造成(即某一时段内出现类中心的非线性变化使有些回波块线性外推产生偏差),这是可以理解的,也需进一步研究解决的问题。但这并不影响多数回波块位置的外推。

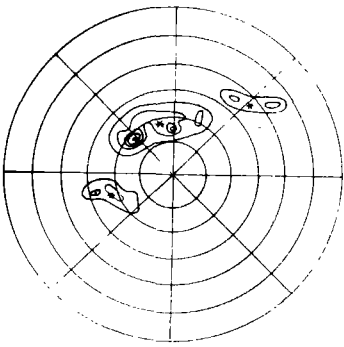


图3

表2 用15:40、16:40两幅图作50分钟线性外推预报

类号	x 坐标 (象素点数)	y 坐标 (象素点数)	移向 (°)	移速 (km/h)	距离 (km)	方位 (°)
1	401	140	113	68	237	58
2	295	165	98	87	116	36
3	169	235	77	32	89	274

3 结 论

(1)对多卜勒天气雷达图象资料取 x_i, y_i, V_i 3个特征量作为聚类因子,并用 ISODATA 算法进行分类是合适的,它对比较稳定移动的强对流回波系统作线性外推预报,可以获得较好的效果。

(2)本模式 方法简便,使用灵活,兼容性较好。可以在 IBM-PC 微机系列上自动运行,每处理一个时次的强度图和速度图约需2—3min,作一次路径外推约需5—8min。

模式中回波块的3个特征量是看作等权重的聚类因子,没有考虑回波强度和面积大小的差异,也没有考虑回波块强度变化对移动路径的影响,这些都需要进一步研究和改进。

参 考 文 献

- 1 Muench HS. *Bull Amer Meteor Soc*, 1976; 57: 298—303
- 2 Zittel WD. *Preprints 17th Conf on Radar Meteor Amer Meteor Soc*, 1976; 514—521
- 3 Blackmer RH, Jr and Duda RO. *Preprints 15th Conf on Radar Meteor Amer Meteor Soc*, 1972; 138—143
- 4 翁富忠. 南京气象学院学报, 1986; (4): 400—404
- 5 赵青云, 汤达章. 南京气象学院学报, 1988; (2): 197—207
- 6 邓 勇, 张培昌. 南京气象学院学报, 1989; 4: 405—413
- 7 吴望名等. 应用模糊集方法. 北京: 北京师范大学出版社, 1985; 71—80

A MODEL FOR PREDICTING STRONG CONVECTION ECHO SHIFT WITH THE WEATHER DOPPLER RADAR INFORMATION

Hu Wen Zhang Peichang Gu Songshan Wang Chunru

(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract A 0—2 hour nowcasting model of the strong-convection echo system is established on the IBM-PC microcomputer system in terms of the weather Doppler radar dataset. From the PPI images preprocessed with the model proposed, a group of patches of intense echoes of interest is singled out, from which a set of eigenvalues is extracted and classified using the fuzzy cluster technique. With the aid of extrapolation of the track a nowcasting is prepared, whereby good results have been obtained on an objective basis.

Key words nowcasting, fuzzy cluster