

# 北方降水性层状云人工增雨潜力区的逐步判别研究\*

李永振 李茂伦 李 薇 崔 莲 陈知新

(吉林省人工影响天气办公室,长春 130062)

王忠范 李 兰

(吉林省气象台,长春 130062)

## 摘 要

利用1991~1999年9年间飞机人工增雨外场试验期间长春市气象局07:00或19:00(北京时,下同)的701测风雷达和吉林省气象台713数字化雷达观测资料,依据穿云实际宏观观测资料将增雨潜力区分为:I级(较大)和II级(较小)。然后应用逐步判别方法求得500 hPa风速的南风分量、回波顶高度、负温层回波厚度/正温层回波厚度、0℃层高度/回波顶高共4个气象因子参加的两组判别函数 $S_1$ 、 $S_2$ 。再用Microsoft VB6.0可视化编程语言,以作业前最近时次探空报中500 hPa风向风速和雷达回波参数为基础将全省划分成9个催化作业区域,根据云系主体回波所在区域,对预催化或正在催化的层状云系进行自动解报、逐步判别方程计算和增雨潜力的自动显示。

关键词:增雨潜力 逐步判别 自动显示

## 引 言

目前国内北方各省份,在人工增雨试验工作中主要使用的催化剂为AgI或干冰(固体 $\text{CO}_2$ ),即用人工冰核或强冷却剂在冷云中触发冰水转化过程的物理机制来达到预想的人工增雨目的。所以过冷水含量大且缺少冰晶的云层才具有一定的人工增雨潜力。而由飞机穿云宏观观测所取得的过冷水含量大小和飞机结冰轻重程度资料恰恰直接反映云层的这一信息。依据云雾物理学基本理论,利用单站701雷达探空资料和713数字化雷达资料,在候选反映云中过冷水含量大小的多个气象因子基础上,经多元分析方法求出增雨潜力逐步判别函数,进行地面定性预测判别,无疑是一种有益的尝试。

在文献[1]的工作中,以影响区24小时绝对增雨量 $\Delta R$ 为依据划分3个级别增雨潜力标准之后,利用单站701雷达探空资料和713数字化雷达资料求出了0~1回归方程。而本文中根据飞机结冰轻重程度划分两个级别的增雨潜力标准之后,利用逐步判别方法求出判别函数,或许更有实际意义。

## 1 资料的收集与分类

首先收集了1991~1999年间(每年自4月15日至7月15日)由701测风雷达和713

\* 本研究得到中国气象局吉林省人民政府人工影响天气联合开放实验室资助。

2002-05-21收到,2002-11-12收到修改稿。

数字化天气雷达相配合进行飞机人工增雨作业的 79 个样本资料。又根据飞机穿云实际宏观观测资料,以过冷水含量大或飞机重度结冰(大于等于 1 cm)云层为 I 类(较大)增雨潜力,而以过冷水含量小或飞机轻度结冰(小于 1 cm)云层为 II 类(较小)增雨潜力。为保证飞机宏观观测资料的一致性和真实性,仅取了几位专家登机观测的资料。又考虑提高单因素方差分析的精度和判别函数的效能,每类都选择了 17 个同样数量的共 34 个样本资料。

## 2 逐步判别计算因子的候选与预选

在 701 雷达探测因子中,为了解区域上空湿度状况候选了 0 °C 层露点、- 40 °C 层以下各特性层的(  $T - T_d$  )平均值,0 °C 层露点、- 40 °C 层以下各特性层的(  $T - T_d$  )平均值和主要反应大气整层水汽饱和程度的 A 指数(  $A = (T_{850} - T_{500}) - [(T - T_d)_{850} + (T - T_d)_{700} + (T - T_d)_{500}]$  ),为了解南来降水天气系统的低、中空水汽输送状况,引进了 850 hPa、700 hPa 和 500 hPa 各层风速的南风分量  $V = |V| \cos \theta$ 。

作者分析发现,催化作业后雷达反射因子增加值与作业前过冷层厚度具有较好的正相关,可用下列经验关系式表示<sup>[2]</sup>:

$$\Delta Z_{\max} = -340.9 + 176.3 H_{0\max} \quad (r = 0.800)$$

即反射因子增加值随目标云负温层厚度增大而有缓慢增加趋势,目标云过冷层越厚,人工增雨催化潜力越大。在这一结果的启发下,对 713 雷达观测选择了如下 6 个候选因子:回波顶高;强核(  $Z > 25$  dBz) 高度;强核高度/回波顶高——云雨区垂直分布;回波强度——云雨区水平分布;负温层回波厚度/正温层回波厚度;0 °C 层高度/回波顶高——云雨区回波温度参数。

这样共候选了 12 个定量因子。然后又通过单因素等重复(每类进行 17 次)方差分析  $F > F(1, 32)_{0.1} = 2.794$  的 F 检验,最终预选了参加逐步判别计算的共 6 个因子,参见表 1。

表 1 候选与预选因子

	候选因子	F 值	预选因子
701 雷达探测因子	0 °C 层露点( °C)	0.89	
	850 hPa 南风分量( m/s)	0.20	
	700 hPa 南风分量( m/s)	0.90	
	500 hPa 南风分量( m/s)	4.93	✓
	- 40 °C 层以下各特性层的( $T - T_d$ )平均( °C)	1.03	
	A 指数	0.35	
713 雷达观测因子	回波顶高( km)	50.09	✓
	强核高度( km)	20.68	✓
	回波强度( dBz)	8.54	✓
	负温层回波厚度/正温层回波厚度	26.4	✓
	0 °C 层高度/回波顶高	33.69	✓
	强核顶高/回波顶高	0.13	

## 3 逐步判别计算

这是一个有 6 个因子,共 34 个样本,分两类的计算。即  $p = 6, k = 2, n_1 = n_2 = 17, n$

$= 34, g = 1, 2$ 。参加计算的因子和增雨潜力的两个类型表示如下。

因子:  $x_1$  为风速的 500 hPa 南风分量,  $x_2$  为回波顶高,  $x_3$  为回波强度大于 20 dBz 的强核顶高度,  $x_4$  为回波强度,  $x_5$  为负温层回波厚度/正温层回波厚度,  $x_6$  为 0 °C 层高度/回波顶高。

类型: 第 I 类为有较大人工增雨潜力, 第 II 类为有较小人工增雨潜力。

### 3.1 计算 $T$ 矩阵与 $W$ 矩阵

第 1 步, 在计算总平均和类平均的基础上, 计算总矩平和类矩平。又在计算离差平方和  $SST$ 、 $SSW$  与离差积和  $SPT$ 、 $SPW$  基础上, 求出组内离差矩阵  $W$  的各元素  $w_{ij}$  和总离差矩阵  $T$  的各元素  $t_{ij}$  之后得出矩阵  $W^{(0)}$  和  $T^{(0)[3]}$ 。

依次分别计算总离差矩阵  $T$  和组内离差矩阵  $W$ 。

$$W^{(0)} = \begin{pmatrix} 2174.56 & -18.29 & 129.01 & -156.93 & -47.13 & 1.26 \\ -18.29 & 40.83 & 8.90 & 66.94 & -8.28 & 0.41 \\ 129.01 & 8.90 & 43.74 & 43.79 & 5.71 & -0.07 \\ -156.93 & 66.94 & 13.79 & 1573.88 & 5.92 & 1.09 \\ -47.13 & -8.28 & 1.71 & 5.92 & 39.96 & -3.19 \\ 1.26 & 0.41 & -0.07 & 1.09 & -3.19 & 0.46 \end{pmatrix}$$

$$T^{(0)} = \begin{pmatrix} 2509.41 & 139.88 & 226.30 & 84.72 & 58.00 & -11.54 \\ 139.88 & 11.54 & 54.85 & 181.08 & 41.38 & -5.63 \\ 226.30 & 54.85 & 72.00 & 84.00 & 32.75 & -3.79 \\ 84.72 & 181.08 & 84.00 & 1748.26 & 81.79 & -8.15 \\ 58.00 & 41.38 & 32.75 & 81.79 & 72.97 & -3.19 \\ -11.54 & -5.63 & -3.79 & -8.15 & -3.19 & 0.95 \end{pmatrix}$$

### 3.2 选入因子

$$\text{按公式 } F_{1i} = \frac{t_{ii} - w_{ii}}{w_{ii}} \times \frac{n - k - L}{k - 1} \quad (i = 1, 2, \dots, p)$$

计算各  $F$  值。

第零步: 引入因子数  $L = 0$ ,  $F_{\max(1, 32)} = F_{12(1, 32)} = 58.5530 > F_{0.1} = 2.89$ , 故引入雷达回波因子  $x_2$  (回波顶高)。

第一步:  $L = 1$ ,  $m_1 = 2$  代入下面公式

$$t_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{t_{m_1 m_1}} & (i = j = m_1) \\ \frac{t_{m_1 j}}{t_{m_1 m_1}} & (i = m_1, j \neq m_1) \\ -\frac{t_{i m_1}}{t_{m_1 m_1}} & (i \neq m_1, j = m_1) \\ t_{ij} - \frac{t_{i m_1} t_{m_1 j}}{t_{m_1 m_1}} & (i \neq m_1, j \neq m_1) \end{cases} \quad w_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{w_{m_1 m_1}} & (i = j = m_1) \\ \frac{w_{m_1 j}}{w_{m_1 m_1}} & (i = m_1, j \neq m_1) \\ \frac{w_{i m_1}}{t_{m_1 m_1}} & (i \neq m_1, j = m_1) \\ w_{ij} - \frac{w_{i m_1} w_{m_1 j}}{w_{m_1 m_1}} & (i \neq m_1, j \neq m_1) \end{cases}$$

计算得新的第一步  $W^{(1)}$  矩阵和  $T^{(1)}$  矩阵 (略)。此时, 又利用上述的  $F_{1i}$  公式计算得

$F_{\max(1,31)} = F_{15(1,31)} = 16.0912 > F_{0.1} = 2.89$ , 故引入温度参数回波因子  $x_5$  (负温层回波厚度/正温层回波厚度)。

第二步和第三步,用上述方法先后计算  $F_{\max}$  得  $F_{16}^{(2)} = 64.356$  和  $F_{11}^{(3)} = 3.4157$ , 都大于  $F_{0.1} = 2.89$ , 故又引入温度参数回波因子  $x_6$  ( $0^\circ\text{C}$ 层高度/回波顶高)和探空因子  $x_1$  (风速的 500 hPa 南风分量)。

第四步,把  $m_1 = 1$  代入  $t_{ij}$ 、 $w_{ij}$  公式计算得新的  $W^{(4)}$  矩阵和  $T^{(4)}$  矩阵。

$$W^{(4)} = \begin{pmatrix} 0.0005 & 0.0004 & 0.0675 & -0.0364 & 0.0012 & 0.0063 \\ 0.0004 & 0.0215 & 0.2856 & 1.7728 & -0.0067 & 0.0349 \\ -0.0675 & -0.2957 & 32.0014 & 1.2589 & -0.3019 & -1.4847 \\ 0.0364 & -1.7728 & 1.2679 & 1432.1161 & -1.2072 & -9.1923 \\ 0.0012 & 0.0085 & 0.3014 & 1.2072 & 0.0606 & 0.4067 \\ 0.0063 & 0.0349 & 1.4798 & 9.1923 & 0.4067 & 4.9055 \end{pmatrix}$$

$$T^{(4)} = \begin{pmatrix} 0.0004 & -0.0004 & 0.0659 & -0.0562 & 2.3840 & 0.0030 \\ -0.0004 & 0.0138 & 0.2822 & 1.5765 & -0.0049 & 0.0611 \\ -0.0659 & -0.2822 & 31.8585 & 4.1006 & 0.1994 & 0.8463 \\ 0.0562 & -1.5765 & 4.1006 & 1450.6562 & -0.3225 & -1.1638 \\ 2.3840 & -0.0049 & 0.1994 & 0.3225 & 0.0178 & 0.0310 \\ 0.0030 & 0.0611 & -0.8463 & -1.1638 & 0.0310 & 1.5549 \end{pmatrix}$$

再对以上已经引入的 4 个因子,考虑有否剔除。此时按公式

$$F_{2i}^{(l)} = \frac{w_{ii}^{(l)} - t_{ii}^{(l)}}{t_{ii}^{(l)}} \times \frac{n - k - (l - 1)}{k - 1}$$

计算得  $\min F_{2i}^{(4)} = F_{21}^{(4)} = 7.25 > F_{0.1} = 2.89$ , 故不剔除。又根据  $F_{1i}$  公式计算得

$$F_{\max(1,28)} = F_{14}(1,28) = 0.3625 < F_{0.1} = 2.89$$

故不引入  $x_4$ , 不剔除已引入因子  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_5$  和  $x_6$ , 也不再引入新因子,逐步判别计算结束。

#### 4 求判别函数及历史样本检验

由  $W^{(4)}$  矩阵得下列两类判别方程式。

第一组:

$$\begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{15} & w_{16} \\ w_{21} & w_{22} & w_{25} & w_{26} \\ w_{51} & w_{52} & w_{55} & w_{56} \\ w_{61} & w_{62} & w_{65} & w_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{15} \\ x_{16} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{15} \\ C_{16} \end{pmatrix}$$

$$C_{10} = -\frac{1}{2} \begin{vmatrix} \overline{x_{11}} & \overline{x_{12}} & \overline{x_{15}} & \overline{x_{16}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{15} \\ C_{16} \end{vmatrix}$$

第二组：

$$\begin{vmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{15} & w_{16} \\ w_{21} & w_{22} & w_{25} & w_{26} \\ w_{51} & w_{52} & w_{55} & w_{56} \\ w_{61} & w_{62} & w_{65} & w_{66} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \overline{x_{21}} \\ \overline{x_{22}} \\ \overline{x_{25}} \\ \overline{x_{26}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} C_{21} \\ C_{22} \\ C_{25} \\ C_{26} \end{vmatrix}$$

$$C_{20} = -\frac{1}{2} \begin{vmatrix} \overline{x_{21}} & \overline{x_{22}} & \overline{x_{25}} & \overline{x_{26}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} C_{21} \\ C_{22} \\ C_{25} \\ C_{26} \end{vmatrix}$$

代入相应值后,解方程求系数和常数项得：

$$\begin{aligned} C_{11} &= 0.0155 & C_{21} &= 0.0103 \\ C_{12} &= 0.1661 & C_{22} &= 0.1294 \\ C_{15} &= 0.3824 & C_{25} &= 0.3278 \\ C_{16} &= 2.9715 & C_{26} &= 3.2231 \\ C_{10} &= -1.7855 & C_{20} &= -1.3911 \end{aligned}$$

放大 100 倍保留小数点以下两位数,最后代入方程得以下两组逐步判别函数。

第一组： $S_1 = -178.55 + 1.55x_1 + 16.61x_2 + 38.24x_5 + 297.15x_6$

第二组： $S_2 = -139.11 + 1.03x_1 + 12.94x_2 + 32.78x_5 + 322.31x_6$

利用  $S_1$ 、 $S_2$  两组判别方程对参加逐步判别计算的 34 个样本进行判别。结果 I 级增雨潜力错判 3 个,II 级增雨潜力全部判对,其拟合率达 91.2%,参见表 2。经显著性检验证明,  $\chi^2 = 23.8 > \chi_{0.001}^2 = 10.828$ , 稳定通过  $\alpha = 0.001$  的  $\chi^2$  检验,这一判别效果是相当显著的。又对 2000 年 4 月 15 日至 7 月 15 日飞机人工增雨作业的 10 架次样本进行了试判别率计算。结果 I 级潜力误判 1 个,II 级潜力一个也不差,试判别率达 90.0%,有一定判别能力。

表 2 拟合率计算

计算	实况		
	I	II	Σ
I	14	0	14
II	3	17	20
Σ	17	17	34

## 5 业务软件平台

本软件平台主要以雷达回波,探空报结合逐步判别函数建立起来的一种降水性层状云增雨试验实际业务化平台,编程语言采用 Microsoft VB6.0 可视化语言。除了云系回波

顶高度覆盖范围因雷达智能化程度限制而必须人机交互输入参数外,其它参数均可实现自动解报、计算判别、存储资料和显示。由前一节中给出的  $S_1$  和  $S_2$  判别方程,可以计算出被测云体的增雨潜力,并在微机屏幕上以不同颜色来区分不同区域增雨潜力(显示图略)。全省由南到北、由西到东依次被划分成 1~9 个不同催化飞行作业区域。屏幕右下角用于人机对话,依据雷达回波实际情况,选择不同的作业区域。不同作业区域则又根据计算结果,以不同颜色来显示不同级别的催化增雨潜力。

## 6 结 论

(1) 经逐步判别计算,从 12 个候选因子中最终选入了  $x_1$ (500 hPa 南风分量)、 $x_2$ (回波顶高)、 $x_3$ (负温层回波厚度/正温层回波厚度)和  $x_6$ (0 °C 层高度/回波顶高)共 4 个因子,其判别拟合率达 91.2%,试判别效果也较好。

(2) 第 1 组方程  $S_1$  的  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  系数比第二组方程  $S_2$  的大,而  $S_1$  的常数项和  $x_6$  系数比  $S_2$  小。表明,增雨潜力要达到 I 级(较大),既要  $S_1 > S_2$ ,则要求除 500 hPa 南风分量、回波顶高、负温层回波厚度均保持一定的较大值外,0 °C 层高度不要太高。

(3) 在候选的共 6 个探空因子中,最终选入判别方程的只有  $x_1$ (500 hPa 南风分量)1 个因子,可见中层的水汽水平输送对人工增雨潜力大小的影响是不可忽略。

(4) Microsoft VB6.0 可视化语言,具有操作方便、升级扩展性强、模块化结构等优点。

## 参 考 文 献

- 1 汪学林,谷淑芳,于勇,等. 两次江淮气旋的云雨特征及其人工播云效果的综合分析. 应用气象学报. 2001,12(增刊):48~57.
- 2 李永振,李茂仑,崔莲. 利用雷达回波参数统计特征评定人工增雨效果. 吉林气象. 2001,(3).
- 3 丁士晟. 多元分析方法及其应用. 长春:吉林人民出版社,1981.

# STEP WISE DISCRIMINATION ANALYSIS OF POTENTIAL AREAS FOR RAIN ENHANCEMENT IN STRATIFORM CLOUDS IN NORTH CHINA

Li Yongzhen Li Maolun Li Wei Cui Lian Chen Zhixin  
(*Jilin Weather Modification Office, Changchun 130062*)

Wang Zhongfan Li Lan  
(*Meteorological Bureau of Jilin Province, Changchun 130062*)

## Abstract

By means of the data of the 701 windfinding radar at Stations 07:00 and 19:00 of Changchun Meteorological Office and the 713 digital radar from Meteorological Bureau of Jilin Province in the past nine years, the potential areas of rain enhancement are classified into two categories: Class I (larger) and Class II (smaller), according to the data from cross-cloud observation. Two groups of discrimination functions  $S_1$ ,  $S_2$ , are given, which include four meteorological factors obtained by using stepwise discrimination analysis method: 500 hPa south wind component, height of echo top, (negative temperature layer echo depth)/(positive temperature layer echo depth) and (height of 0 °C layer)/(height of echo top). Then, by using Microsoft VB6.0, Jinlin Province is divided into nine seeding operation areas according to radar echo parameters and 500 hPa wind from the near-time radiosonde observation; the automatic decoding and the rain enhancement potential calculation and automatic display for pre-seeding and seeding stratiform clouds are conducted.

**Key words:** Rainfall enhancement potential Stepwise discrimination Automatic display