

利用数字化雷达回波参数分析 人工增雨播云条件^①

迟竹萍 陈金敏 朱平盛

(山东省气象研究所, 济南 250031)

提 要

利用数字化 711 测雨雷达观测的层状云雷达立体扫描资料和探空资料, 分析得出层状云降水部分特征。并利用多元逐步回归分析方法获得催化作业效果指标 $y = 2.0 \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在使用雷达立体扫描资料进行人工增雨作业实时指导方面做了探讨。

关键词: 雷达立体扫资料 催化指标 潜力分析 人工增雨

引 言

干旱是山东省主要自然灾害之一, 每年干旱造成的成灾面积占各种自然灾害成灾面积一半以上, 随着经济的发展, 水资源短缺矛盾日益突出。人工增雨是增加自然云降水, 开发利用空中水资源的有效途径, 目前, 实施人工增雨的主要途径是向某些发展降水尚缺乏一定条件或效率不高的云中撒播冰核, 催化云体, 使之改变云的相态或谱分布, 促使云-水转化, 在适当时机对关键性云体部位, 进行有科学指导的人工催化作业, 可达到人工增雨的目的。测雨雷达能及时探测云和降水系

统的结构分布和发展变化, 是指导人工降雨作业的有力工具之一。

1 基本特征

1.1 参数分析

层状云是山东省春秋季节的主要降水云系, 也是山东省缓解春秋干旱, 实施人工降雨的主要对象, 认识和掌握层状云降水雷达回波特征, 具有现实意义。本文以 1999 年春季 11 次层状云降水过程 40 个样本资料为基础, 初步分析了层状云降水的 711 数字化雷达回波参数, 所使用的资料均为立体扫描资料, 结果如表 1。

表 1 降水云回波参数及其它地区作业指标

地名	云底高度/km	云顶高度/km	云顶温度/°C	垂直厚度/km	负温层厚度/km	强中心强度/dBz
山东聊城		>3.5	-1~-32.9	>2.0	>0.9	>30
吉林	<1.5		≥-20	中层厚≥0.8		
河南	≤2	>5	-6~-20	≥3	>1.5	>30
湖北	<1	>5				
河北	≤2	≥5	-8~-24	≥3		≥30

降水云云顶温度介于 $-5^{\circ}\text{C} \sim -24^{\circ}\text{C}$ 之间的占 85%; 云顶高度一般在 3.5~7km 之间, 有时达到 8km, 其中达到 4.5km 以上的占 87.5%; 云厚大于 2km、负温层厚度大于 1.5km 的各占 85% 和 92.5%; 回波强度一般为 20~35dBz, 大于 30dBz 的占 72.5%, 其中, 云底至 0°C 层平均回波强度为 30dBz, $0^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$ 层平均回波强度为 23dBz, $-5^{\circ}\text{C} \sim$

-10°C 层平均回波强度为 20dBz, -10°C 至云顶平均回波强度为 13dBz。与其它地区层状云催化作业指标相比, 山东省西部地区绝大部分降水性层状云适合人工催化作业。

1.2 云中含水量分析

云中含水量反映了云中降水的水资源条件, 它的含水量多少和空间分布与云的动力学和热力学效应密切相关, 是影响增雨作业

^① 本文得到山东省气象局青年科学基金资助。

效果的重要因素。1972年, Greene 和 Clark 提出垂直累积液态含水量(Cvil)概念^[1], 随着计算机技术的发展和普及, 利用配备了数字化终端的天气雷达, 能够迅速方便地得到雷达探测区域内的垂直累积液态含水量。基本原理为, 在一定的假设基础上^[2], 在理论上不难得到液态含水量 M 和雷达反射率因子 Z 之间的关系, 具体方法如下:

单位体积的雷达反射率因子:

$$Z = \int_0^{\infty} N(D)D^6 dD \quad (1)$$

雷达反射率因子 Z 是从用雷利后向散射表示的反射率公式中引出的, 用 Z 表示的雷达气象方程只适用小球性粒子, 计算雷达气象方程中, $|(m^2 - 1)/(m^2 + 2)|_w \doteq 5|(m^2 - 1)/(m^2 + 2)|_i$, 即水滴散射是同半径冰雪晶散射的五倍, 干冰球回波只有同体积水球回波的五分之一; 观测表明^[3], 云中水滴直径只有 0.01 ~ 0.02mm, 最大不超过 0.1mm; 雨滴的直径以 0.7 ~ 0.9mm 最多; 冰晶和雪晶的区分直径为 0.3mm, 冰晶直径一般小于 0.3mm。由式(1)知, 反射率因子 Z 与粒子直径的六次方成正比, 因此, 在零度层以上, 雷达反射率因子 Z 仍可近似看作是由少数大雨滴后向散射造成的。

单位体积内的含水量:

$$M = \frac{1}{6} \pi \rho \int_0^{\infty} N(D)D^3 dD \quad (2)$$

由式(1)考虑 M - P 谱分布及 Γ 函数可得:

$$Z = \int_0^{\infty} N_0 e^{-\lambda D} D^6 dD$$

$$Z = N_0 \Gamma(7) / \lambda^7$$

若 Z 取 $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ 、 D 取 cm 、 N_0 取 cm^{-4}

为单位, 则有

$$Z = 10^{12} N_0 \Gamma(7) / \lambda^7 \quad (3)$$

由式(2)考虑 M - P 谱分布及 Γ 函数可得

$$M = \frac{1}{6} \pi \rho \int_0^{\infty} N_0 e^{-\lambda D} D^3 dD$$

$$M = \frac{1}{6} \pi \rho N_0 \Gamma(4) / \lambda^4$$

若 M 取 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 D 取 cm 、 N_0 取 cm^{-4} 、 ρ 取 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 为单位, 则有

$$M = 10^6 \cdot \frac{1}{6} \pi \rho N_0 \Gamma(4) / \lambda^4 \quad (4)$$

由(3)、(4)两式可得

$$Z = 10^{12} N_0 (\Gamma(7) / [10^6 \pi \rho N_0 \Gamma(4) / 6]^{7/4})$$

$$\cdot M^{7/4} = 2.042 \cdot 10^4 M^{7/4}$$

从而得

$$M = 3.44 \cdot 10^{-3} Z^{4/7} \quad (5)$$

对 M 沿高度积分, 进而得到

$$Cvil = \int_{h_0}^{h_1} M dh = \int_{h_0}^{h_1} 3.44 \cdot 10^{-3} Z^{4/7} dh \quad (6)$$

式(6)中, h_0 、 h_1 分别表示回波的底高及顶高, $Cvil$ 的单位为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

实际使用中, 因体扫资料在高度轴上是不连续的, 故将式(6)的积分计算化成下面的求和形式

$$Cvil = 3.44 \cdot 10^{-3} \sum [(Z_i + Z_{i-1}) / 2]^{4/7} \Delta h$$

Δh 是体扫资料中两层 PPI 之间的高度 (单位: m)。

1.2.1 垂直累积液态水含量分析

计算降水云中 0°C 层-云顶、-5°C 层-云顶、-10°C 层-云顶和云中整层垂直累积液态含水量, 结果如表 2:

表 2 垂直累积含水量分布

云层	样本/个	$Cvil/\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$			百分比	平均高度/km
		最大	最小	平均		
云底-云顶	40	1140.3	219.4	736.5		
0°C层-云顶	38	393.0	36.7	202.7	27.5	
-5°C层-云顶	34	276.4	19.6	107.6	14.6	
-10°C层-云顶	32	110.7	11.9	61.2	8.3	
0°C层						3.1
-5°C层						4.4
-10°C层						4.9

由表2可以看出:

(1)云体整层垂直累积液态水含量平均为 $36.5\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,最大值为 $1140.3\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,最小值 $219.4\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; 0°C 层-云顶累积液水含量平均占云体含水量的 27.5%,云中过冷水含量超过云体含水量 20%的占 75.7%,对应地面平均降雨强度为 $2.4\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,云中过冷水含量占云体含水量 10%~20%,占 20.5%,对应地面平均降雨强度为 $0.5\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$;液态水含量主要存在于云体 0°C 层以下,这说明层状云中,上升气流弱,云中含水量主要由云下部的大雨滴组成。

(2) -5°C 层平均高度为 4.4km, -10°C 层平均高度为 4.9km,作业高度一般在 4.0~5.0km 左右,位于 -5°C 层和 -10°C 层之间, -5°C 层-云顶、 -10°C 层-云顶累积液水含量基本代表了作业层至云顶过冷水含量情况,其含量多少与催化作业效果密切相关,二者分别占云体含水量的 14.6%和 8.3%左右。其中, -5°C 层-云顶过冷水含量超过云体含水量 20%的占 21.1%,对应地面平均降雨强度为 $3.5\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,过冷水含量超过云体含水量 10%的占 58.3%,对应地面平均降雨强度为 $2.1\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$; -10°C 层-云顶过冷水含量超过云体含水量 10%的占 29.0%,对应地面平均降雨强度为 $3.0\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,过冷水含量超过云体含水量 5%的占 61.3%,对应地面平均降雨强度为 $2.3\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。统计中发现,负温层、 -5°C 层和 -10°C 层 Cvil 有很好的对应关系,三者同步变化。

(3)利用最小二乘法,计算过冷水含量与地面雨强的关系。得到 0°C 层-云顶两者相关系数为 $r = 0.7275$,线性回归方程为 $y = 0.3143 + 0.01123x$; 0°C 层-云顶过冷水含量占云体含水量百分比与地面雨强的线性关系为 $y = 1.2218 + 6.1711x$,相关系数为 $r = 0.8052$; -5°C 层-云顶过冷水含量与地面雨强的线性关系为 $y = 0.5202 + 0.02541x$,

相关系数为 $r = 0.6069$ 。

1.2.2 含水量垂直廓线

影响山东省的层状云降水系统,有由强锋面抬升引起的深厚层状云降水系统及弱锋面抬升形成的浅薄层状云系统,两者在雷达回波参数及含水量垂直分布上都有所不同。

含水量垂直分布廓线,反映了不同高度的云层对降水形成的影响。从云元素的质量增长率

$$\left. \begin{array}{l} \text{凝结凝华增长率} \\ dm/dt = 4\pi D_r(\rho - \rho_r) \\ \text{碰并增长} \end{array} \right\}$$

$$dm/dt = \pi R^2 EW_l(U_R - U_r)$$

来看,对较大的云元素来说,碰并增长是主要增长形式。因此,强回波区也即液态含水量大值区,是冰晶凝附、碰连、雪晶融化、雨滴碰并增长过程发生区。图1、图2用个例给出了这两种层状云含水量 M 的垂直分布廓线。

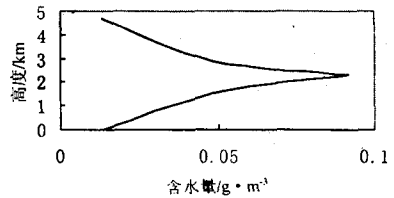


图1 1999年3月17日含水量垂直分布廓线

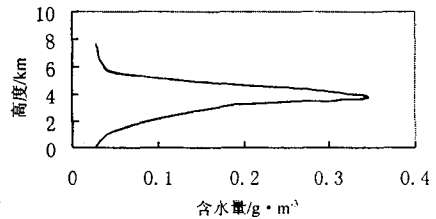


图2 1999年5月16日含水量垂直分布廓线

图1是1999年3月17日弱锋面抬升引起的浅薄层状云系统。在体扫资料上,回波顶部比较平坦并略有起伏,云顶高度 4.7km,云顶温度 -9.8°C ;回波强度弱而均匀,强回

波出现在 2.9km, 厚度为 0.6km, 此区域即为液态水含量大值区, 为 $0.092\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 是高层冰雪晶下落融化造成的强回波, 利用济南探空资料可得零度层实际高度为 3.35km, 与雷达回波零度层亮带相差 0.45km, 负温层厚度 1.45km; 云中和负温层累积液态水含量较少, 分别为 $406.2\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $47.6\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 过冷水含量仅占云体含水量的 11.6%; 此类系统云中水汽条件较差, 液态水含量大值区位于零度层以下, 高层雪晶下落到零度层以下融化成雨滴形成地面降水, 一般造成地面小雨、有时中雨, 增雨潜力较小。

图 2 为 1999 年 5 月 16 日强锋面抬升引起的深厚层状降水云系统。在体扫资料上, 降水前期 16 日 14:35, 回波顶部有起伏, 在大片均匀回波中, 耸立着一个个柱状回波, 说明云中有弱对流; 云顶高度 7.8km, 云顶温度较低为 -21.7°C , 负温度厚度 4.4km; 云中上升气流比弱锋面系统强, 表现在回波强度较强, 含水量为 $0.344\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的大值区位于零度层以上 500m 左右, 云中过冷水含量较多, 冷层过冷水含量为 $260.6\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 占云体含水量的 26.5%, 云中冰雪晶主要在零度层以上过冷水含量大值区中淞附、碰并雨滴增长; 在 17 日 16:40 降水后期, 回波顶高下降为 6.3km, 液态水含量大值区向云的下部移动, 在零度层以下 0.3km 出现厚度为 0.6km 的融化层亮带。此类系统云中水资源丰富, 通常造成地面中~大雨, 催化潜力较大。

2 作业指标确定

2.1 协变量的选择

挑选协变量的原则是这些因子应当同降水过程有明显内在物理联系, 雷达回波参数反映了云雾降水的宏微观条件, 如云内垂直气流强度在雷达回波上表现为回波强度强弱与回波顶高度等。结合探空资料, 我们挑选如下雷达参数因子作为协变量: 回波顶高度 (x_1)、云顶温度 (x_2)、负温层厚度 (x_3)、负温层过冷水含量 (x_4)、负温层过冷水含量占云体液水含量百分比 (x_5)、 -5°C 层至云顶过

冷水含量 (x_6)、回波强度 (x_7), 计算各协变量与降水云降雨强度 y 的相关系数分别为: $r_{1y} = 0.6007$, $r_{2y} = -0.4510$, $r_{3y} = 0.4138$, $r_{4y} = 0.7275$, $r_{5y} = 0.8052$, $r_{6y} = 0.6069$, $r_{7y} = 0.3652$ 。由相关系数可知, 与降雨强度相关最好的因子是负温层过冷水含量占云体含水量百分比, 相关系数为 0.8052, 其次为负温层、 -5°C 层至云顶过冷水含量, 这说明云中过冷水含量与降水云的自然降水效率关系密切。

2.2 多元回归方程的建立及指标确定

利用逐步回归方法依次引进偏回归平方和最大的因子, 直到所有显著的因子都包括在回归方程中为止, 样本资料经逐步回归分析得到预报方程:

$$y = 0.2243x_1 + 2.4325x_5 + 0.4962(7)$$

复相关系数 $r = 0.8346$, 标准差 $s = 21.7\%$ 。

若将云顶高度 4.5km, 负温层累积含水量百分比 20% 作为临界指标代入式 (7), 得催化作业判断指标 $y = 2.0\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。当估算降雨强度 $y > 2.0\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 催化作业有效, 且 y 值越大, 效果越好。用春季 4 次高炮飞机作业资料进行检验, 估计降雨强度分别为 2.0、2.3、2.5、3.7, 实际作业一次效果不明显, 三次效果较好。

3 问题及小结

①山东省西部地区降水性层状云, 绝大部分适合催化作业, 催化作业判断指标为 $y = 2.0$, 当估算降雨强度 $y > 2.0\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 催化作业有效。存在的问题是作业指标还有待进一步检验订正。

②弱锋面抬升引起的降水系统, 云中含水量最大值出现在零度层以下, 有明显的融化层带, 负温层累积含水量较少, 催化潜力小; 强锋面抬升引起的降水系统, 含水量最大值位于零度层以上, 负温层含水量较多, 催化潜力较大。

(下转第 53 页)

参考文献

- 1 Greene DR, Clark R A. Vertically integrated liquid new analysis tool. Mon Wea Rev, 1972, 100(7): 548~552 water-A.
- 2 李承明等. 雨滴微波辐射特征量之间关系的探讨. 南京气象学院学报, 1995: 1.
- 3 张培昌等. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 1992.
- 4 黄兴友. 常规数字化天气雷达体扫资料的处理及应用. 南京气象学院学报, 1993: 3.
- 5 游来光. 利用粒子测量系统研究云物理过程和人工增雨条件. 北京: 中国气象局人工影响天气办公室, 1993.
- 6 游景炎等. 云降水物理和人工增雨技术研究. 北京: 气象出版社, 1994.

An Analysis of the Seeding Conditions by Using 711-Type Digitized Radar Echo Parameters

Chi Zhuping Chen Jinmin Zhu Pingsheng

(Shandong Meteorological Institute, Jinan 250031)

Abstract

Using the volume scannings from 711-type digitized weather radar and telemetered data, the basic characters of precipitation caused by sheet cloud are obtained. by means of multi-variate stepwise regression method, the catalyzing effect target ($y = 2.0\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) is obtained. The actual time guide on the cloud being catalyzed are analysed by using radar volume scannings.

Key Words: radar volume scannings catalyzing target latent analysis