

层状云人工增雨宏观判据在 MICAPS 平台上的演示与应用

连志鸾¹ 邢开成²

(1 河北省石家庄市气象局,石家庄 050081;2 河北省沧州市气象局,沧州 061001)

摘要 针对地市级普遍缺乏可业务应用的人工增雨潜力实时分析及预测系统的情况,以常规探空资料和 T213 数值预报产品为基础资料,开发了几种人工增雨宏观诊断场,并实现了这些诊断场的定时自动处理和在 MICAPS 平台上的实时分析显示。其中,冰面过饱和度可诊断“冰水转化区”的垂直分布,进而为确定合适的播撒高度提供判据。 $T - T_d$ 垂直分布可反映准饱和湿层伸展的高度和厚度,其顶部为合适的播撒高度;特征温度层高度可提供“播云温度窗区”的高度和厚度,也可为进一步确定播撒高度提供判据。几种方法综合应用可确定最佳播撒高度。增雨潜力系数与降水的演变趋势很一致,可为选择合适的作业时机提供参考。以一次典型过程为例,对上述方法做了试用。为了定量确定人工增雨潜力的大小,综合考虑了各种物理量(要素)场对降水的贡献以及降水预报对宏观增雨潜力的指示意义,应用多因子权重集成法,制作人工增雨潜力等级预报,并用 2004 年 2~5 月 7 次层状云降水过程进行实例应用检验,证明具有一定效果。

关键词 层状云 人工增雨 宏观判据 MICAPS 平台 增雨潜力 等级预报

引言

层状云是北方春秋季节重要的降水云,也是该季节人工增雨的主要对象之一。目前,地市级普遍开展了以火箭为主的地面人工增雨作业。因此研究可供地市级操作的人工增雨潜力实时分析及预测系统,对提高增雨效率很重要。目前,对层状云的播云判据和指标多建立在云的微观观测基础上^[1],而地市级无法获得这些资料,飞机增雨的一些可播度判别指标不能用于地面人工增雨作业。对增雨潜力的分析能够实时地投入业务应用的也不多^[2]。因此,充分利用作业前地市级所能获得的大量的宏观观测(常规探空资料)和数值预报产品,获取人工增雨潜力区在当前及未来一段时间内的分布及其演变信息,对指导增雨作业就显得非常重要。根据层状云成云致雨的微物理特征及其对环境场的要求,本文尝试应用常规资料和数值预报产品,将层状云人工增雨宏观判据及其诊断场在 MICAPS 平台上实时显示,并应用于日常人工增雨业务,取得了一定效果。

1 几种宏观增雨判据及其诊断方法

MICAPS 系统提供了大量实况探空(或数值预报产品)的天气学诊断场,但可用于分析人工增雨云物理过程的诊断量比较少。为方便业务需要,本文以常规探空和 T213 数值预报产品为基础资料,开发了几种层状云人工增雨宏观判据诊断场。

1.1 冰面过饱和度

北方地区春秋季节适合增雨的降水性层状云多为冷云,这些云中,冰、水、汽共存,按照“贝吉龙过程”,若冰面过饱和($e - E_i > 0$, e 为水汽压, E_i 为冰面饱和水汽压)冰晶便可增长,因此, $e - E_i > 0$ 的区域为“冰水转化区”。不同高度的 $e - E_i$ (冰面过饱和度)可反映宏观增雨潜力随高度分布,因此, $e - E_i$ 垂直分布可为人工增雨作业提供合适播撒高度的判据。本文采用如下公式计算 e 和 E_i ^[3,4]:

$$e = 6.108 \exp \left\{ 5415 \times \left| \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_d} \right| \right\}$$

河北省“十五”重点科技攻关项目“火箭人工增雨作业条件与关键技术研究”(03220602D)资助

作者简介:连志鸾,女,1967 年生,硕士,高级工程师,主要从事天气预报及人工影响天气工作,Email:lianzhiluan@sina.com

收稿日期:2004 年 6 月 20 日;定稿日期:2004 年 10 月 20 日

$$E_i T = E_0 \left| \frac{T_0}{T} \right|^{\frac{C_f}{R_W}} \exp \left| \frac{(L_s + C_f T_0)(T - T_0)}{R_W T_0 T} \right|$$

式中 $T_0 = 273.16 \text{ K}$, $E_0 = 6.1078 \text{ hPa}$ 为 0°C 时的饱和水汽压, $R_W = 46.09878364 \times 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 为水汽的比气体常数, $C_f = 0.251 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 为冰的升华潜热随温度的变化率, $L_s = L_0 + L_f - C_f(T - T_0)$ 为冰的升华潜热, $L_0 = 2499.52 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 为 0°C 时水汽的凝结潜热, $L_f = 333.55 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 为冰的融解潜热, 其他为常用符号。

1.2 增雨潜力系数

据文献[5], 冰面过饱和度可表示增雨潜力

$$F(h), F(h) = \begin{cases} e - E_i & \text{当 } e > E_i \\ 0 & \text{当 } e < E_i \end{cases} \text{由此构造增雨}$$

潜力系数 $P, P = \int_{h_1}^{h_2} F(h) dh$, 式中 h_1, h_2 分别为播云温度窗的上下限温度层高度, 本文取为 -5°C , -24°C 所对应的高度。为了计算方便, 本文将增雨潜

力系数 P 改进为 $P = \sum_{i=i_1p}^{i_2p} F_i(h)$, i 为 $-5 \sim -24^\circ\text{C}$

间各标准等压面层, i_1p, i_2p 分别为 -5°C , -24°C 对应的最低标准等压面层次。 P 越大, 增雨潜力越大。把 $P > 0$ 的区域视为增雨潜力区。 P 的水平分布, 反映了增雨潜力区的分布及移动。故增雨潜力区的演变在某种程度上可为选择合适作业时机提供判

1.3 特征温度层高度

云温与云中粒子相态分布密切相关。冷云中冰晶凝华增长的速率峰值也随温度变化。对层状冷云而言, 在 $-10 \sim -24^\circ\text{C}$ 播云有效, 峰值在 $-15 \sim -20^\circ\text{C}$, 这称为冷云静力催化的“播云温度窗”[5]。鉴于温度对人工增雨作业的重要性, 本文结合春秋季节华北上空大气温度层结特点, 选取 0°C 、 -5°C 、 -10°C 、 -24°C 为人工增雨特征温度, 并应用拉格朗日二次插值计算其相应的高度。将计算结果输出为 MICAPS 第3类、第4类数据格式, 可以方便地在 MICAPS 窗口下显示, 为增雨作业时选择合适播撒高度提供参考。

2 各种诊断场在 MICAPS 平台上的显示实现

与 9210 通讯系统配套的 MICAPS 系统, 对各类气象信息具有强大的处理分析、数据检索和图像

显示功能。本文利用它所提供的各类数据接口, 实现了人工增雨诊断场的自动处理和在 MICAPS 平台上的分析显示。

2.1 数据处理

MICAPS 提供了定时运行控制程序 `mtimer.exe`, 它所带参数为定时时间表文件 `ws.dat`。只要按照该文件规定格式, 将人工增雨诊断程序添加到该文件中, 并设定具体运行时间, 各诊断场即可被定时地处理成 MICAPS 格式, 以备调阅。

2.2 数据检索

利用 MICAPS V2.0 版“流程”的“快速浏览”控件, 修改其数据检索接口文件, 将人工增雨诊断场分4类(水汽条件、动力条件、增雨潜力、特征温度层高度)归类放置其中(图1)。增雨指挥人员调阅时, 只需启出该控件, 即可看到“人工增雨诊断场”按钮。点击该按钮, 出现列表框, 其中列出了所有可供调阅的人工增雨诊断场。从中点击选择, MICAPS 窗口中即显示相应场。

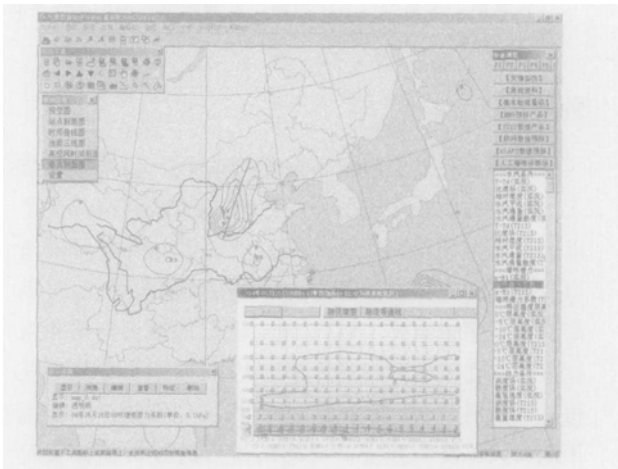


图1 人工增雨诊断场在 MICAPS V2.0 平台上的显示界面

2.3 数据分析

对于平面数据显示, MICAPS V2.0 提供了“前翻”、“后翻”功能, 可方便地显示各人工增雨诊断场随时间的演变; “上翻”、“下翻”功能可用来分析某诊断场在垂直方向上的分布。除此之外, 可利用 V2.0 提供的“辅助图表”分析控件, 制作“格点场空间剖面”。该功能可以“剖”出任一直(或曲)线上的垂直剖面, 能更直观地显示出某要素的空间分布特征。用此功能可分析湿层和准饱和湿层($T - T_d \leq 2^\circ\text{C}$)的厚度, 以及冰水转化区($e - E_i$ 大值区)最佳高度, 为选择合适作业部位提供参考。

3 宏观增雨潜力等级预报

层状云为大范围空气运动所致,其降水范围大、持续时间长。为了进一步定量分析某次过程增雨潜力的大小,本文综合各种物理量(或要素)场对降水的贡献,应用物理量权重集成法做宏观增雨潜力等级预报。

3.1 因子选取

根据春秋季节降水性层状云形成的物理量场特点,以及人工增雨所特别关心的一些要素场,另外,还考虑各家降水预报在确定人工增雨宏观潜力时的参考价值,本文从水汽条件、动力条件、增雨潜力诊断、降水预报等 4 个方面,选取 $T - T_d$ 、水汽通量、

水汽通量散度、涡度、散度、垂直速度、增雨潜力系数(中心值和区域比)、T213 预报降水、日本传真图预报降水、省市气象台预报降水等 11 个因子。表 1 中第 1 ~ 6 个因子选取水平范围 $112^{\circ} \sim 116^{\circ} \text{E}$, $37^{\circ} \sim 39^{\circ} \text{N}$ 内各格点值的平均,垂直方向选取 850 hPa、700 hPa 的合计平均。第 7、8 个因子分别选取 $109^{\circ} \sim 117^{\circ} \text{E}$, $33^{\circ} \sim 43^{\circ} \text{N}$ 内的中心数值(反映增雨潜力区强度),以及该范围内增雨潜力系数大于 0 的格点数占总格点数的比率(反映增雨潜力面积)。

3.2 因子等级划分

依据经验,将选定因子按其值大小以及对降水的有利程度进行等级编码,每个因子分 4 档,0 为不利于降水,档次越高对降水越有利(表 1)。

表 1 因子等级划分

因子		等级编码			
		0	1	2	3
1	700 hPa、850 hPa 水汽通量/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	< 2	2 ~ 5	5 ~ 10	≥ 10
2	700 hPa、850 hPa 水汽通量散度/($10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	> 0	0 ~ - 4	- 4 ~ - 8	$\leq - 8$
3	700 hPa、850 hPa + 925 hPa $T - T_d / ^{\circ}\text{C}$	> 7	7 ~ 4	4 ~ 2	≤ 2
4	700 hPa、850 hPa 涡度/($10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$)	< 10	10 ~ 20	20 ~ 30	≥ 30
5	700 hPa、850 hPa 散度/($10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$)	> 0	0 ~ - 5	- 5 ~ - 10	$\leq - 10$
6	700 hPa、850 hPa 垂直速度/($10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)	> - 5	- 5 ~ - 10	- 10 ~ - 20	< - 20
7	中心值/hPa	≤ 0	0 ~ 2	2 ~ 4	≥ 4
8	区域比	≤ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	≥ 60
9	T213 预报降水量/mm	< 2.5	2.5 ~ 5	5 ~ 10	≥ 10
10	日本传真图预报降水量/mm	无雨	小雨	小到中雨	中雨以上
11	省市气象台降水预报				

3.3 增雨潜力等级计算方法

对选定物理量应用权重集成法计算增雨潜力等级,方法如下:

$$M = \sum_{k=1}^{11} \omega_{k,i} Y_k, \quad \omega_{k,i} = P_{k,i} / \sum_{i=0}^3 P_{k,i}$$

M 为增雨潜力等级基值, Y_k 为第 k 个因子的等级编号, $\omega_{k,i}$ 为第 k 个因子的权重系数, $P_{k,i}$ ($k = 1, 8$)为当出现层状云降水时,第 k 个因子在 i 等级上出现的概率。 $\omega_{k,i}$ ($k = 1, 8$)可以用近期常规探空资料诊断的物理量场计算出来。预报降水量因子等级权重 $\omega_{k,i}$ ($k = 9, 11$),为某预报产品在近期一段时间内的降水预报准确率(TS 评分)。为了吸收近期层状云降水在物理量场上的表现特点及近期各家的降水预报准确率变化情况,将 $\omega_{k,i}$ ($k = 1, 8$)、 $\omega_{k,i}$ ($k = 9, 11$)的计算编制成自动处理软件,每天充入实时资

料计算一次,使权重系数随时调整。从实时物理量场和降水预报中提取 Y_k ,计算 M ,根据 M 值大小将增雨潜力等级划分为 4 级: $M \leq 6$ 为 0 级,无增雨潜力; $6 < M \leq 8$ 为 1 级,增雨潜力一般; $8 < M \leq 12$ 为 2 级,增雨潜力较高; $M > 12$ 为 3 级,增雨潜力高。

3.4 实例应用检验

河北省 2004 年 2 到 5 月共出现了 7 次层状云降水。为了验证本文增雨潜力等级预报的可行性,本文应用 2003 年春(秋)季共 16 次层状云(或混合云)降水过程资料计算 $\omega_{k,i}$ 及 M ,然后应用 T213 资料(计算第 1 ~ 9 个因子)、日本传真图和省市的降水预报(第 10 ~ 11 个因子),对 2004 年春季的 7 次层状云降水过程做人工增雨潜力等级预报的计算验证。计算结果见表 2。

表 2 人工增雨潜力(M)等级计算结果

过程日期 (月 - 日)	M 值	增雨潜力 等级	24 h 最大降水 量/ mm	24 h 平均降水 量/ mm
* 02 - 20	16	3	17.8	10.6
03 - 31	7	1	3.7	1.5
* 04 - 25	13	3	33.4	23.6
✓04 - 29	14	3	12.8	5.5
05 - 02	9	2	8.7	5.5
05 - 11	10	2	3.9	2.5
✓05 - 25	12	2	14.9	5.9

注:“✓”为在降水后期石家庄区域有对流云嵌入;“*”为强过程。

表 2 中 24 h 最大(平均)降水量由石家庄全区 17 个站的 24 h 降水量中挑取最大(求算术平均)得到。计算结果基本能够反映实际增雨潜力的大小。整体上看,增雨潜力等级大小与最大、平均降水量对应关系较好。在实际应用中具有一定的参考价值。不足之处是,该结果对弱降水过程计算的增雨潜力等级略偏高,如 4 月 29 日 3 月 31 日 5 月 11 日。

4 播撒高度和作业时机的确定

影响增雨效果的关键技术是作业时机和作业部位的选择。对于层状云造成的大范围、持续降水而言,可把拟增雨区降水开始加强,作为合适的作业时机,作业部位主要是确定作业区最佳的播撒高度。

4.1 播撒高度确定方法

在 MICAPS 平台上,沿增雨潜力区轴线,制作实况和 T213 预报的 $T - T_d$ 和 $e - E_i$ 剖面,了解当前和未来一段时间内 $T - T_d$ 和 $e - E_i$ 的垂直分布。一般认为,环境场达到饱和或准饱和时,播云后冰晶和雨滴在长大和下落过程中不易蒸发,增雨效率高。因此,准饱和湿层($T - T_d \leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$)顶部、 $e - E_i$ 大值区(冰水转化能力强的区域)为合适的播撒高度。然后再查看该高度内的气温是否在层状冷云“播云温度窗”内,选取两者重叠的高度范围为最合适的播撒高度。

4.2 作业时机确定

当实况增雨潜力区呈大片分布,其前缘已影响石家庄,且本地实况已出现降水加强趋势时,为合适的作业时机,此为参考之一。应用 T213 资料计算各预报时效的增雨潜力系数。当增雨潜力区大片覆盖石家庄,此时作业效果较好。查看其相应的预报时效,即可确定出作业时间,此为作业时机参考之二。应用 T213 资料、日本传真图和省市的降水预报,计算各个预报时效的人工增雨潜力等级,取增雨

潜力等级最大的预报时段为最佳作业时机,此为参考之三。

4.3 典型个例应用

以 2004 年 2 月 20 日一次较强过程为例,试用上述方法确定播撒高度和作业时机。

2004 年 2 月 20 日华北和江淮地区自西向东出现了一次大范围降雨过程,河北大部降了小到中雨,河北省的降雨中心(18 mm)在石家庄西北部—保定东南部,主要降雨时段在 20 日傍晚到夜间。在 2 月份出现这样强的降雨是比较少见的。分析系统演变以及 θ_{se} 沿槽线的水平和垂直分布(图略),可看出这次过程主要是由于西南暖湿气流沿北来冷空气楔爬升,而被大范围抬升,造成降水。

图 2 为在 MICAPS 平台上抓取的增雨潜力系数分布图,由图看出,2004 年 2 月 20 日 08:00 在内蒙古、陕西已有分散的增雨潜力区出现;到 20 日 20:00 从内蒙西南部、山西、河北中北部为大片增雨潜力区覆盖,此时山西正出现强降雨,河北西部降雨已开始加强;21 日 08:00 增雨潜力区移动到河北东部和山东境内,对应的强降雨也东移到这个区域。增雨潜力区与降水系统及降水区的演变趋势很一致。即随系统东移加强,零散的增雨潜力区也随之加强东移,20 日 20:00 大范围成片分布。由此看出石家庄在 20 日 20:00 前后实施增雨作业非常有利。此时,增雨潜力区在本区上游,其前缘已影响到石家庄,且实况降雨也已开始加强。

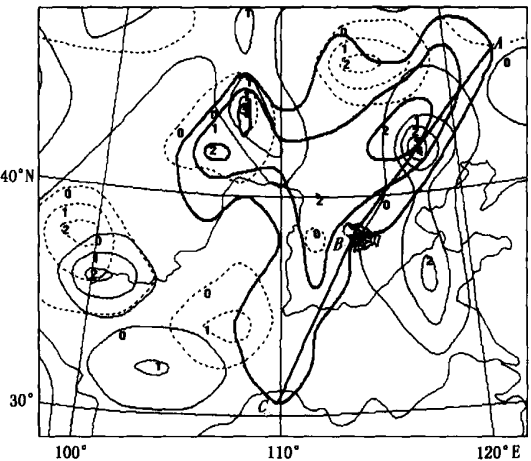


图 2 2004 年 2 月 20 日 08:00(点线) 20 日 20:00(粗实线)、21 日 08:00(细实线)增雨潜力区演变(单位:0.1 hPa)
(直线 A - B - C 为图 3 剖面基线)

在 MICAPS 平台上,沿 20 日 20:00 增雨潜力区前沿(图 2 中折线 A-B-C)制作 $T-T_d$ 和 $e-E_i$ 垂直剖面(图 3)看出,石家庄上空(B 点对应位置)冰水转化区($e-E_i>0$)集中在 500 hPa 高度(图 3a),且 500 hPa 以下为深厚的准饱和湿层($T-T_d\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$),即 500 hPa 处于准饱和湿层顶部(图 3b)。

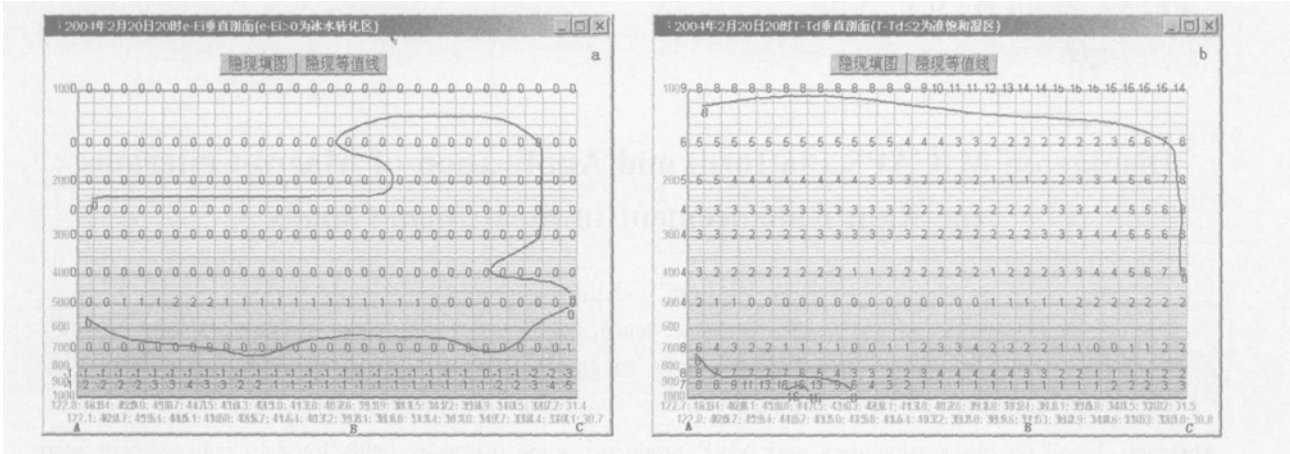


图 3 $e-E_i$ (a)和 $T-T_d$ (b)沿增雨潜力区前缘的垂直剖面填图及等值线
($e-E_i$ 单位:hPa; $T-T_d$ 单位: $^{\circ}\text{C}$;剖面基线:图 2 中折线 A-B-C)

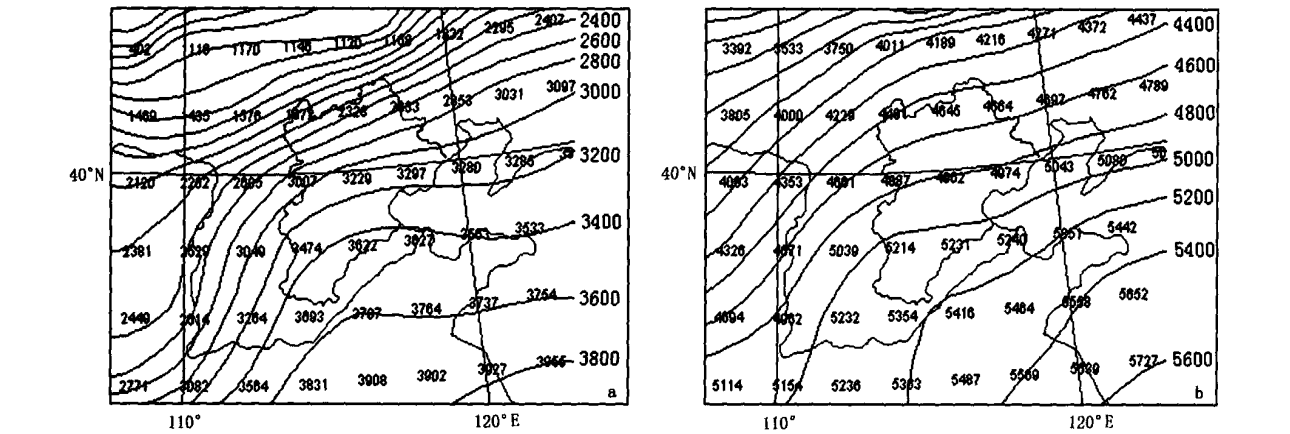


图 4 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a)、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b)层对应高度的格点值及等值线(单位:m)

5 小结

- (1) 本文以常规探空资料和 T213 数值预报产品为基础数据,开发了几种人工增雨宏观诊断场,实现了这些诊断场的定时自动处理和在 MICAPS 平台上的分析显示。
- (2) 不同高度的冰面过饱和度可诊断冰水转化区的垂直分布,可为确定合适的播撒高度提供判据。 $T-T_d$ 垂直分布可反映准饱和湿层伸展的高度和

此时,石家庄上空 500 hPa 对应的高度为 5530 m。再调阅各特征温度层高度,石家庄上空 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度分别约为 3200 m、5000 m(图 4)。另外再考虑 WR 火箭在箭体升空 4000 m 后就边飞行边撒播 AgI 催化剂,其有效撒播路径 6000 m^[6]。因此将增雨作业撒播部位最佳高度选在 4000~5000 m。

- 厚度,准饱和湿层顶部是合适的播撒高度。由特征温度层高度,可确定“播云温度窗区”的高度和厚度,可为进一步确定播撒高度提供判据。几种方法综合应用可确定最佳播撒高度。增雨潜力系数与降水的演变趋势很一致,可为选择最佳作业时机提供参考。
- (3) 本文综合考虑各种物理量(要素)场对降水的贡献,以及降水预报对人工增雨宏观潜力的指示意义。应用多因子权重集成法,制作人工增雨潜力等级预报。并用 2004 年 2~5 月 7 次层状云降水过

程进行实例应用检验,证明具有一定效果。

参考文献

- 1 段英,吴志会,石立新.飞机人工降水作业云可播性条件的观测研究.见:游景炎编著.云降水物理和人工增雨技术研究.北京:气象出版社,1994.155 - 163
- 2 周德平,耿素江,杨旭,等.辽宁夏季积云降水发生频率及人工影响潜力分析.气象科技,2003,31(4):243 - 247
- 3 程炳岩,张永亮,霍锐,等.河南省空中水资源的时空分布特征.见:张存,周毓荃主编.人工影响天气优化技术研究.北京:气象出版社,2000.24 - 26
- 4 陈创买,郭英琼.气象常用参数和物理量查算表.北京:气象出版社,1980.1 - 4
- 5 中国气象局科技发展司.人工影响天气岗位培训教材.北京:气象出版社,2003.47,120 - 121
- 6 河北省人工影响天气办公室.高炮火箭人工增雨防雹培训教材.石家庄:河北省气象局,2001.9 - 13

Display on MICAPS Platform and Application of Macro-Criteria for Rain Enhancement in Stratiform Clouds

Lian Zhiluan¹ Xing Kaicheng²

(1 Shijiazhuang Provincial Meteorological Office, Shijiazhuang 050081; 2 Cangzhou Meteorological Bureau, Hebei Province, Cangzhou 061001)

Abstract: Based on observation data and NWP products, some diagnosis fields for rain enhancement were worked out and the real-time automatic display on MICAPS platform was realized. The supersaturation with respect to ice can be used to diagnose the vertical distribution of ice-water conversion area, then determine the seeding height. The vertical disposition of $T - T_d$ can show the altitude and depth of the quasi-saturation layer, the top of which was the suitable seeding position. The height of the characteristic temperature layer can be used to determine the altitude and thickness of "seeding temperature window," a seeding position criterion. The optimal seeding altitude can be determined by synthesizing above methods. The trend of rainfall enhancement potential coefficient was identical with that of rainfall, which can provide reference for choosing appropriate seeding time. The above-mentioned methods were applied during a typical rain case. In the weighted integrating manner, several environmental physical fields and rainfall forecast were synthesized, and the graded forecast of rain enhancement potential was made. The verification was conducted by seven stratiform-cloud rain cases occurred from February to May 2004. The results show that the method is encouraging.

Key words: stratiform clouds, rainfall enhancement, macro-criterion, MICAPS platform, rain enhancement potential, graded forecast