

文章编号: 1006-4354 (2004) 01-0001-04

层状云增雨催化剂用量的估算

余 兴

(陕西省气象科学研究所, 陕西西安 710015)

摘 要: 通过人工影响天气原理的分析, 从过冷水量的平衡关系, 分析了作业时机与部位; 从过冷水量、冰面与水面饱和水汽密度差、固相雨胚、催化剂扩散等方面, 在国内外的观测事实与数值模拟结果的基础上, 估算了催化剂的用量与播撒速率, 对实际工作有一定的参考意义。但是, 所得的结果是初步的, 还存在许多方面的不确定性, 有待进一步完善。

关键词: 层状云增雨; 过冷水量; 固相雨胚; 催化剂; 用量

中图分类号: P481

文献标识码: A

近年来, 我国人工增雨活动非常活跃, 作业范围、次数、投入经费有了很大提高, 开展了许多研究^[1], 建立了一系列作业指标与判据, 以提高选择作业云体、部位、时机的准确性。但是, 一旦实施播云的云体、部位、时机确定后, 还需要知道用什么催化剂、多大剂量、什么方式更合适, 因为不同的播云技术方法会导致不同的作业效果。用量的研究较为复杂, 影响因素多, 存在许多不确定性, 实际工作中还存在着较为随意的现象。主要原因一是理论研究滞后, 缺乏对实际工作的指导; 二是云生成、发展、消亡过程中的复杂、多变、不确定性, 使外场研究很难获得完整的有说服力的客观依据。胡志晋^[2]对不同催化剂在不同温度下播云的剂量问题进行了研究, 利用播云线有效扩散速率为 1 m/s 的结论, 从人工冰晶达到 20 L⁻¹浓度标准的角度, 估算了催化剂的用量, 指出层状云增雨首选的催化剂为致冷剂。

层状冷云是我国北方春秋季节人工增雨的主要对象, 经典理论指出, 催化引入云中的人工冰晶可以通过贝吉隆过程 (由于水面的水汽饱和比湿比冰面的高, 使得冰晶增长比水滴有利, 在水汽供应不足时, 冰晶增长而云滴蒸发消耗) 使过冷水转化为降水, 冷云激发人工增雨是以转化过冷

水含量为基础。层状云冷层中有多少水, 除了供给自然冰晶增长成固相雨胚外, 还能供给人工冰晶增长达到固相雨胚的尺度, 这部分的水量是讨论催化剂用量上限的重要依据。

1 催化剂用量估算

层状云中的上升速度远小于对流云, 一般为几到十几 cm/s, 其中的过冷水量也较小, 过冷水粒子直径多在 50 μm 以下, 50 μm 以上直到几 mm 的冻滴很少存在。层状云的水平范围远远大于垂直厚度, 水凝物在水平方向上的损耗可不考虑。那么, 在冷层 (层状云中固相雨胚的形成区) 中, 水的主要来源是上升气流引起的过饱和水汽转化为液态水和从暖层带入的液态水 (ΔW), 主要的汇项为冰相增长时消耗的液态水 (W_i) 和上升气流将落速小于上升速度的液态水 (W_d) 带出冷层。过冷水的平衡关系可表示为:

$$\Delta W = W_{\text{scl}} + W_i + W_d, \quad (1)$$

式中 W_{scl} 为过冷水量。从上式可以看出, 在层状云的生命期中, 如果源项与汇项始终处于平衡状态, 则过冷水不存在; 如果源项大于汇项, 则过冷水存在并积累; 如果源项小于汇项, 则过冷水消耗。当云处于发展阶段到降水初期, 源项大于汇项; 当云处于稳定降水阶段, 源项与汇项大体平衡; 当

收稿日期: 2003-11-04

作者简介: 余 兴 (1962-), 男, 江西乐平县人, 硕士, 高工, 从事人工影响天气工作。

基金项目: 国家科技部“西部开发科技行动”重大攻关项目 (2001BA901A41)

云处于降水后期到消散阶段，源项小于汇项。Gayet 等人^[3]对欧洲地区层状云观测结果表明：在层状云中，过冷水量的量级多小于 0.1 gm^{-3} ，无降水云的过冷水量大于有降水云。陈万奎等人^[4]用 FSSP 测量四川层状云，正在酝酿降水的春季层状云上部的过冷水量可达 0.5 gm^{-3} 。由此得出，当云处于发展阶段或降水初期，一般源项大于汇项，冷层中过冷水存在并积累，此时为人工催化的有利时机；而在降水后期，则不利于人工催化。另外，选择作业部位应该在源大于汇的区域，也就是过冷水比较丰富、辐合条件好的区域。这也是增雨作业时选择时机和部位的一般原则。

在混合相的层状云中，产生降水的主要条件是，在冷层中形成固相雨胚，在暖层中启动碰并增长，形成自然降水。冰晶增长成固相雨胚需要消耗过冷水量、冰面与水面饱和水汽密度差 $\Delta\rho$ ^[5]（消耗的冰相也源于此两项）。那么，冷层中的过冷水量总是处于一种动态变化的过程中，不断地产生、消耗，以维持云、降水过程的持续。一旦降水发生后，如果云中还能探测到过冷水，说明此时的过冷水量除用于冰雪晶增长、形成自然降水外，还有盈余，这部分过冷水量可用以人工催化，是人工增雨的基础。这就是混合相的层状云增雨的静力催化原理。据此，提出催化剂用量的计算公式

$$m_s n_s = \frac{V_s W_L}{m_i},$$

(2)

$$\overline{m_i} = \frac{\sum_i n_i m_i}{\sum_i n_i m_i},$$

(3)

$$W_L = W_{scl} + \Delta\rho,$$

(4)

式中 m_s 为催化剂播撒速率 (gkm^{-1})， n_s 为催化剂

的核化率 (g^{-1})， V_s 为 1 km 线长的催化剂扩散后覆盖的体积 (m^3)， $\Delta\rho$ 为冰面与水面饱和水汽密度差 (gm^{-3})， W_L 为用于人工冰核长到固相雨胚尺度所需的过冷水和 $\Delta\rho$ ， m_i 、 n_i 为固相雨胚 i 尺度的质量 (g)、数量， $\overline{m_i}$ 为单个固相雨胚的平均质量 (g)。

取固相雨胚等效水滴平均直径为 $100\text{ }\mu\text{m}$ ， $\overline{m_i} = 5.24 \times 10^{-7}\text{ g}$ 。播云催化剂在云中的扩散是个很复杂的问题，天气条件、气流、风切变、大气热力动力状况等都对其产生影响，所以，不同的作业云体，扩散状况不一样。据观测和数值模拟结果，在层状云中 1 km 播云线扩散 1 h 后达到宽度、厚度约为 $8.0、0.8\text{ km}$ ^[6-7]， $V_s = 6.4 \times 10^9\text{ m}^3$ 。代入式 (2) 中得到：

$$m_s = 1.22 \frac{W_L}{n_s} \times 10^{-6}.$$

(5)

常用的催化剂有致冷剂（干冰、液态二氧化碳、液氮等）、碘化银焰剂和碘化银丙酮溶液，它们的核化机制和条件不同，不同条件下的核化率有较大差异。致冷剂的成核率基本不受温度、水汽、过冷水量的影响，碘化银粒子必须在水面饱和、有过冷水存在的区域才能大量成冰，其成核率受温度的影响十分明显，常用的碘化银丙酮溶液旧配方只能 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 以下有过冷云水处有效，我国研制的新配方在 $-8\text{ }^\circ\text{C}$ 以下有效。

据国内外对降水性层状云观测结果，过冷水量的平均值多为 $10^{-1} \sim 10^{-2}\text{ gm}^{-3}$ ，假定过冷水量全部用于人工冰核增长达到固相雨胚大小，且不考虑 $\Delta\rho$ 的贡献。把 W_L 和 n_s 代入式 (5)，计算各种催化剂在不同温度下的用量，结果列表 1。由表可见，虽然与文献 [2] 估算方法不同，但计算结果却基本一致。

表 1 不考虑 $\Delta\rho$ 时不同温度下各种催化剂的用量和成核率

催化剂	$-6\text{ }^\circ\text{C}$	$-7\text{ }^\circ\text{C}$	$-8\text{ }^\circ\text{C}$	$-10\text{ }^\circ\text{C}$
致冷剂	$1.22(10^2 \sim 10^3)/10^{12}$	$1.22(10^2 \sim 10^3)/10^{12}$	$1.22(10^2 \sim 10^3)/10^{12}$	$1.22(10^2 \sim 10^3)/10^{12}$
AgI 焰剂	$4.1(10^2 \sim 10^3)/3 \times 10^{11}$	$1.22(10^1 \sim 10^2)/10^{13}$	$1.22(10^1 \sim 10^2)/10^{13}$	$6.1(1 \sim 10)/2 \times 10^{13}$
AgI 丙酮溶液新配方		$6.1(10^2 \sim 10^3)/2 \times 10^{11}$	$2(10^2 \sim 10^3)/6 \times 10^{11}$	$3(10 \sim 10^2)/4 \times 10^{12}$
AgI 丙酮溶液旧配方		$3(10^3 \sim 10^4)/4 \times 10^{10}$	$6.1(10^2 \sim 10^3)/2 \times 10^{11}$	$1.22(10^2 \sim 10^3)/10^{12}$

注：“/”上方为催化剂用量 (gkm^{-1})，“/”下方为成核率 (g^{-1})。

常用的作业飞机有 An26、Y12, An26 的平均飞行速率约为 100 m/s, Y12 的平均飞行速率约为 70 m/s, 利用表 1 的结果, 可以计算出 2 种作业飞机的播撒速率。飞机增雨所用的 AgI 发生器, 当气流速度与飞行速度一定时, 播撒速率为定值, 一般为 0.3 gs^{-1} , 不可调。由表 2 可见, 用

表 2 不考虑 $\Delta\rho$ 时不同温度下各种催化剂的播撒速率				gs^{-1}
催化剂	$-6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-7\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$
致冷剂(An26)	12.2~122	12.2~122	12.2~122	12.2~122
致冷剂(Y12)	8.5~85	8.5~85	8.5~85	8.5~85
AgI 焰剂(An26)	41~410	1.2~12.2	1.2~12.2	0.6~6.1
AgI 焰剂(Y12)	28.7~287	0.85~8.5	0.85~8.5	0.42~4.2
AgI 丙酮溶液新配方(An26)		61~610	20~200	3~30
AgI 丙酮溶液新配方(Y12)		42.7~427	14~140	2.1~21
AgI 丙酮溶液旧配方(An26)		300~3000	61~610	12.2~122
AgI 丙酮溶液旧配方(Y12)		210~2100	42.7~427	8.5~85

碘化银丙酮溶液作为催化剂作业, 即使在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下作业, 也很难满足播撒速率的要求, 相差 1~2 个数量级。2002 年、2003 年陕西省人工影响天气中心采用自行研制的液态二氧化碳播撒设备, 播撒速率可调, 安装在 Y12 飞机进行增雨作业, 播撒速率为 12 gs^{-1} , 基本满足播撒要求。说明在层状云增雨中, 致冷剂为首选催化剂。考虑到人工冰核的增长不仅消耗过冷水, 还可以消耗 $\Delta\rho$, 假定 $\Delta\rho$ 中的 50% 可以用于人工冰核增长。据陈万奎等人^[5]计算的 $\Delta\rho$ 的结果代入式 (4), 计算 W_L 后, 代入式 (5), 计算各种催化剂在不同温度下的用量, 结果列表 3。由表 3 可见, 这么大的作

表 3 考虑 $\Delta\rho$ 不同温度下各种催化剂的用量				gkm^{-1}
催化剂	$-6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	
致冷剂	$(1.22\sim2.31)\times10^3$	$(1.38\sim2.47)\times10^3$	$(1.46\sim2.55)\times10^3$	
AgI 焰剂	$(4.1\sim7.7)\times10^3$	$(1.38\sim2.47)\times10^2$	$(7.3\sim12.7)\times10^1$	
AgI 丙酮溶液新配方		$(2.3\sim4.1)\times10^3$	$(3.65\sim6.37)\times10^2$	
AgI 丙酮溶液旧配方		$(6.9\sim12.35)\times10^3$	$(1.46\sim2.55)\times10^3$	

业剂量, 不论选择致冷剂, 还是碘化银丙酮溶液, 在实际作业中是无法实现的。即使考虑到许多方面的不确定性给估算带来的偏差, 用量上缩小 1~2 个量级, 也只有致冷剂和 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下碘化银丙酮溶液新配方才能做到。这是否也说明在增雨实践中, 实际的作业用量有些偏小, 加上碘化银发生器的播撒速率一般不可调, 作业中选择致冷剂更为合适, 这些有待在外场作业中检验完善。如果考虑催化剂的活化率不是 100%, 则还应乘以系数, 用量更大。

2 讨论

本文从过冷水量的角度, 结合国内外的观测事实与数值模拟结果, 讨论了催化剂的用量与播撒速率, 所得的结果是初步的, 讨论中存在着以下的不确定性。

2.1 过冷水量不能全部用于人工冰核的增长, 云中存在过冷水是维持冰、水共存的条件, 也是固相雨胚形成的条件。但是, 到底有多少过冷水量才能使云中保持冰、水共存状态, 目前还不知道, 文中没有考虑。

2.2 1 km 播云线扩散 1 h 后覆盖的体积存在着不确定性, 体积增大催化剂用量要增加, 体积减小用量也要相应减少。另外, 播云线扩散后覆盖的体积内催化剂浓度不是均匀分布的, 有时会产生局部的过量催化。

2.3 过冷水量大小与分布、催化剂的活化率、 $\Delta\rho$

文章编号: 1006-4354 (2004) 01-0004-05

2002-07-04 子长特大暴雨中尺度分析

雷崇典¹, 邓小丽², 杨金海³

(1. 延安市气象局, 陕西延安 716000; 2. 西安市气象局, 陕西西安 710016;
3. 子长县气象局, 陕西子长 717300)

摘 要: 对陕北子长一次特大暴雨的中- β 尺度对流云团分析得出: 云顶亮温较一般暴雨云团偏低, 有 2 个单体在对流尺度内相互作用, 一侧单体潜伏变化为暴雨云团形成提供了有利抬升机制、水汽资源和能量, 为强对流单体形成暴雨云团提供了发展条件。另外, 大尺度环流长波槽后部弱上升气流是暴雨发生的大尺度背景场。对流中低层干空气的侵入是特大暴雨形成的重要特征之一。

关键词: 中- β 尺度; 云团; 深对流; T_{BB}

中图分类号: P458.2 **文献标识码:** B

2002-07-04T03: 00—08: 00, 延安北部的子长县出现局地特大暴雨天气过程, 总降水量 195.3 mm, 引起清涧河水暴涨, 形成百年不遇的特大洪涝, 直接经济损失 3 亿多元。此次过程中, 06—08 时 2 h 降水量达 130.0 mm, 1 h 最大降水量为 92.3 mm, 暴雨水平尺度大约 40 km 左右 (2 h 降水量 $R>100$ mm)。特大暴雨中心在子长县城。

1 中- β 尺度对流云团发展演变

此次降水是由中- β 尺度对流云团产生的。7 月 4 日的卫星红外云图上可以看出 (图 1), 01 时在子长县区的西侧附近有小块的积云生成并发展, 云顶亮温 T_{BB} 为 -43°C , 云顶高度达 12 km, 02 时在暴雨区西侧和西北侧有 2 块发展较快的积云, 内嵌 $T_{BB}<30^{\circ}\text{C}$ 面积膨胀, 发展成对流单体, 南侧的对流单体 (β_A) 移入暴雨区上空, 2: 40

收稿日期: 2003-07-10

作者简介: 雷崇典 (1963-), 男, 陕西合阳人, 高工, 从事天气预报、强对流天气分析和研究工作。

中用于人工冰核增长的比例、固相雨胚大小与分布等方面都存在着不确定性。这些对用量的估算会产生影响, 带来用量与播撒速率的不确定性。考虑到上述的不确定性, 对增雨作业而言, 为安全起见 (保持冰、水共存), 对表中的估算值适当缩小几倍到 1 个量级; 如果是消云减雨作业, 则可适当放大估算值, 更好地破坏云中的成雨条件。

参考文献:

[1] 王广河, 胡志晋, 陈万奎. 人工增雨农业减灾技术研究 [J]. 应用气象学报, 2001, 12 (增刊): 1-9.
[2] 胡志晋. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨 [J]. 应用气象学报, 2001, 12 (增刊): 10-13.
[3] Gayet JF, Glraud V, Delannoy D, et al.

Description of a French cloud microphysical data band: application to globol change [J]. WMP Report, 1992, 19: 188-193.
[4] 陈万奎, 马培民. 四川春季一次层状云宏微观特征和降水机制 [J]. 气象科学技术集刊, 1985, 30-36.
[5] 陈万奎, 严采繁. 冰相雨胚转化水汽密度差的实验研究 [J]. 应用气象学报, 2001, 12 (增刊): 23-29.
[6] 余 兴, 樊鹏, 王晓玲, 等. 层状云中非垂直多条撒播线源催化剂扩散的数值模拟 [J]. 气象学报, 1998, 56 (6): 708-723.
[7] Yu Xing, Dai Jin, Jiang Weimei, et al. A three-dimensional model of transport and diffusion of seeding agents within stratus [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2000, 17: 617-635.