

碘化银地面发生器增雨(雪)作业 可行性及作业时机选择

秦长学 杨道侠 金永利

(北京市人工影响天气办公室, 北京 100089)

摘要 设置于高山迎风坡的碘化银发生器增雨(雪)作业,其关键是上升气流时段的选择,上升气流关系着有效核入云效率。文章分析了碘化银地面发生器增雨(雪)作业的可行性和利用天气图、卫星云图、雷达和物理量计算等方法确定作业时机的可能与技术。

关键词 人工增雨 作业时机选择 AgI 地面发生器

引言

北京市人工增雨(雪)作业主要使用飞机、火箭、高炮和气球携带 AgI 焰弹等工具,以上作业方式均受空域限制,有时没有空域而错失作业时机。因此发展不受空域限制,可自主指挥作业的增雨(雪)系统很有必要。AgI 地面发生器具有作业成本低,指挥环节少,不受空域限制的优点。其缺点是催化剂需依赖上升气流送入云中 -4℃层以上才能核化,所以设置在山顶迎风坡的发生器可缩短催化剂入云输送距离,尤其冬半年对地形云作业效果较好。

北京市总面积 16800km²,西北部山区占 2/3,有大小几十座海拔高度 1000~2000m 的山峰可供建催化点。这些山峰多数建有气象站、微波中继站和寺庙等,对建设 AgI 地面发生器增水系统的用电、保护、操作提供了条件。

AgI 地面发生器增雨(雪)作业关键是选好作业时机,使作业时段处于上升气流区,这样才能取得增雨效果。

1 建立高山迎风坡的碘化银发生器增雨(雪)系统的必要性

(1)图 1 为北京观象台 1991~1993 年 3 年平均月降水量分布曲线图,此 3 年间年均降水量为

572.4mm,接近 30 年均值 577mm,所以其分析结果有一定的代表性。从图中可知,北京市年降水量的 80%为雷阵雨产生。

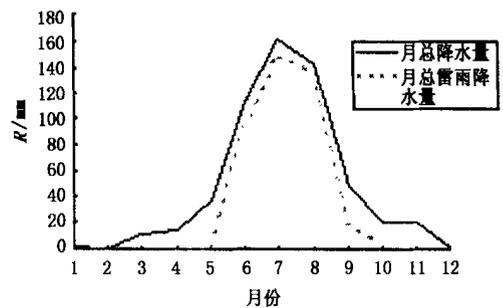


图 1 平均月降水量分布曲线

(2)飞机具有催化剂利用效率高,机动性强,播撒面积大等优势,是增雨作业中首选手段。但由于受空域、飞行条件、飞机性能等因素制约,所以有时错过了最佳作业时机或干脆不能作业。尤其雷阵雨,一般飞机无法入云作业。

(3)高炮、火箭适合对雷阵雨作业,可准确的把催化剂送入云中适当部位,虽没有飞机的机动性,但由于投入低,对缓解局地干旱和增加水资源有一定作用。但布点受机场、空中走廊限制,不能根据需要建立作业点,作业时间受空域繁忙限制一般只有几分钟到十几分钟,有时不能按科学的作业设计执行。

(4)气球携带 AgI 焰弹增水作业有不受飞行条

件限制的优点,但其设点和作业仍受空域的限制,一般白天空中飞机多时很难申请到合适空域。

鉴于以上现有作业工具的不完备性,作为补充手段,开发一种全天候,不受空域限制,可自主科学布点和指挥,且投资较少的碘化银发生器增水系统十分必要。

(5)以色列从 20 世纪 60 年代开始,每年在平原丘陵地带设置了几十个 AgI 地面发生器,主要利用上升气流将催化剂带入云中适当部位进行增雨作业,以缓解干旱问题。设置在山顶迎风坡的增水装置,对大多数降水云系来说,已工作在云内,催化剂再由迎风坡上升气流携带到云中适当部位,其优越性显然大于设于平原的装置。

(6)由于此系统基本播撒装置为适于高山环境的催化剂地面发生器,所以作业时不需请示空域及作用时间,可大大减少指挥环节。图 2 为高炮(火箭)增水作业和高山增水系统作业的指挥流程比较。

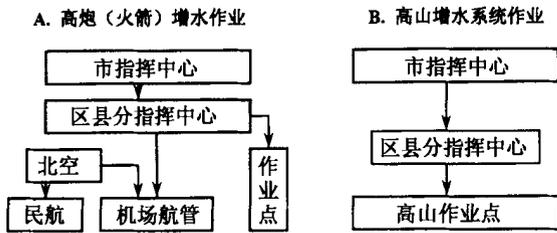


图 2 指挥流程比较

从图 2 可看出,采用高山增水系统作业指挥环节大为减少,关键是指挥中心可根据天气形势和生产需要,选择最有利的作业时机,自主指挥作业,可大大提高作业的科学性和效率。

2 高山迎风坡的碘化银发生器增雨(雪)作业的可行性

北京市人工影响天气办公室研制的适合于高山使用的 AgI 地面发生器,催化剂为 2% AgI 含量的丙酮溶液,增溶剂为碘化铵,此配方经美国科罗拉多州立大学的 960L 等温云室测定,其成核率 -6℃ 时达 10^{11} 个·g⁻¹, -10℃ 时达 10^{13} 个·g⁻¹, -20℃ 时可达 10^{15} 个·g⁻¹。中国气象科学研究院 3m³ 等温云室测定,指标大致相同^[1]。贮存溶液不锈钢罐容积 50L。通过对容器内加压使溶液通过 0.8mm 直径喷枪喷出,同时通过气流将液滴粉碎成 1.0~9.2μm 大小的液滴,通过高压脉冲点火,燃烧炉火焰温度达 1000℃ 左右。

通过实验比较,燃烧温度控制在 1000℃ 以上,丙酮-碘化银溶液流量控制在 25L·h⁻¹ 左右效果较好。其中 AgI 含量应为 400g,如按 AgI 成核率 10^{13} 个·g⁻¹ 计算,那么该发生器每小时可产生人工核 400×10^{13} 个,合 1.1×10^{12} 个·s⁻¹。50L 溶液中应含 800g 左右 AgI,一次作业整罐溶液烧完,可产生人工核约 8×10^{15} 个。

1982 年 ЛВ КТИНОВ 曾使用以下公式计算了地面源扩散情况^[2]:

$$q = \frac{Q}{2 \pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[-\frac{y^2}{2 \sigma_y^2} \right] \exp \left[-\frac{(z - H_0)^2}{2 \sigma_z^2} \right] + \exp \left[-\frac{(z + H_0)^2}{2 \sigma_z^2} \right] \quad (1)$$

式(1)中 Q 为源的核生成率,σ_y 和 σ_z 分别为 y 和 z 轴方向上催化剂质点浓度分布的均方差,u 为 x 轴上的分风速,H₀ 为源高。使用式(1)计算北京地面发生器产生源扩散情况。计算中取 H₀ = 1000m, u = 6m·s⁻¹, Q = 1.1 × 10¹² 个·s⁻¹, σ_y 和 σ_z 分别根据不同稳定度分类取不同值。这里按 B 型取 σ_y(x) = 0.27 x^{0.91}, σ_z(x) = 3.31 × 10⁻⁴ x^{1.855},稳定度的分类依据太阳高度角、总云量、低云量和地面风速确定。催化剂的分布以相对浓度 q' 表示:

$$q' = \frac{q}{q_0} \quad (2)$$

式(2)中 q₀ = 10³ 个·m⁻³,为云中冰核最佳浓度,计算结果见图 3。从图 3 可看出,在拖放高度形成上下 1km 厚,长度 3km 的高浓度区,浓度值达 10⁵ 个·m⁻³ 以上。浓度 10⁴ 个·m⁻³ 可到 4km 高度,浓度 10³ 个·m⁻³ 可达 6km 高度。

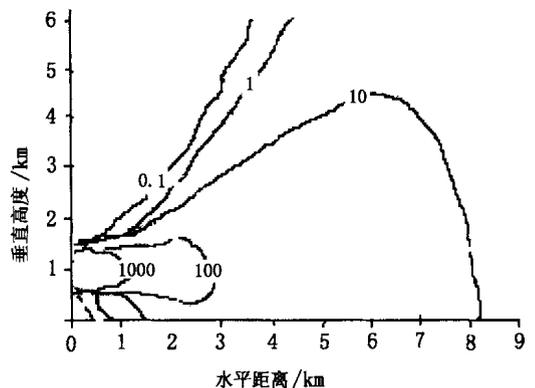


图 3 催化剂垂直扩散图

图 4 是 z = 0m 的催化剂水平扩散分布图,由于源高 1000m,所以 0.1 线扩散到地面已到距源下点

1 km 处。从图 4 看出, 催化剂水平扩散浓度 10^4 个 $\cdot \text{m}^{-3}$ 可达 8 km 远, 宽度 2 km; 浓度 10^3 个 $\cdot \text{m}^{-3}$ 水平扩散宽度可达 4 km 以上。AgI 成核域温 $I_c < -4^\circ\text{C}$, 北京市 10~4 月 0°C 层高度月平均值低于 2560 m, 所以在冬半年用设置在高山上的 AgI 发生器进行增雨(雪)作业较易实现。夏半年月平均 0°C 层高度最高 7 月为 4610 m, 根据如上计算结果, 作业实施比较困难, 须有较强的上升气流, 才能将足够浓度的催化剂送入 0°C 层以上。具体条件尚须进一步进行研究。由此可见使用设置在高山上的 AgI 发生器在冬半年进行增雨(雪)作业是可行的。

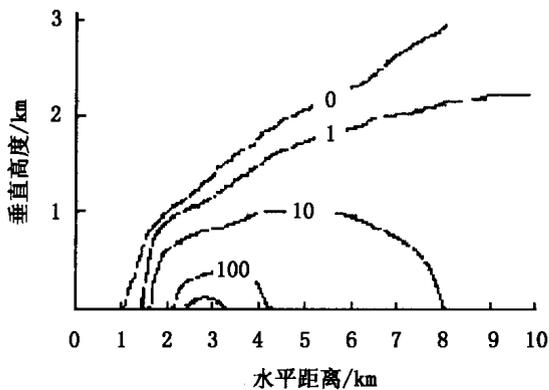


图 4 催化剂水平扩散图

3 作业时机选择

AgI 地面发生器增雨(雪)作业关键技术是作业时段作业点应处于上升气流区, 这样才能保证一定量的有效粒子进入云内 -4°C 层以上。所以作业时机选择实质就是上升气流时段的选择。

3.1 天气图和卫星云图方法

由于摩擦力所造成的地转偏差, 使低压中空气逆时针旋转且有内流分量, 使空气水平辐合引起上升气流。具体讲暖锋前 600 km 左右到降水发生前为上升气流^[3]。

冷锋附近强烈抬升作用可在 2~3 km 高度形成上升气流。再向上暖空气沿冷锋楔的上方滑升, 上升速度较弱。

卫星云图上锋面云系往往为带状, 长达数千公里, 宽约 2~8 个纬距。多为多层云系, 上为卷云, 下为中云或低云。一般锋前多为上升气流区。对于活跃的冷锋中第一类冷锋, 即暖空气主动沿锋面上升, 锋面要定在云带前边界上。如属第二类冷锋即暖空气因冷空气下沉被动沿锋面上滑, 锋面应定在云带

后边界上, 不活跃冷锋一般云后边界很清楚, 锋面应定在后边界上。天气图间隔 6 h, 其间冷锋位置可根据 1 h 一张的卫星云图来确定。

准确使用天气图和卫星云图资料可选定合适的作业时机, 取得较好的作业效果。例如 2001 年 11 月 12 日 08 时 500 hPa 天气图上从贝加尔湖到河套地区为一高空槽, 北京位于槽前暖区, S W 风 $28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。作业前从地面天气图和卫星云图上可看出冷锋位于北京以西张家口一带。北京上空为层积云, 云底高度为 1500 m。地面气温为 -1°C , T_d 为 -2°C , 温度较大。

18:00~21:30 密云县在云蒙山上进行了 AgI 地面发生器增雨作业, 使用 AgI 丙酮溶液 62 kg, 作业后在云蒙山周围及下风方形成 15 mm 以上的降雨量高值区, 而其他地方降雨量均在 10 mm 以下。

3.1 垂直气流计算

实验作业时机选择不能依赖一种工具, 应该多种方法综合判断才能有好的效果。例如 2002 年 5 月 28 日 08 时, 700 hPa 以上冷槽偏北, 850 hPa 为东北低涡, 槽线已过张家口。北京市处槽前暖区, S W 风 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 槽后 N W 风 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。地面图上冷锋位于呼和浩特以北, S W 风 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。14 时冷锋已过张家口, 北京 S W 风 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由天气形势判断, 北京地区应产生辐合上升气流。

垂直气流的计算方法通常采用运动学法, 绝热法和降水量反算法。其中绝热法计算公式为

$$\omega = \frac{\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T}{\gamma - \gamma_d} \quad (3)$$

式中 ω 为上升气流, $\frac{\partial T}{\partial t}$ 为任一等压面上温度局地变化, 一般采用某一时刻探空记录减去 24 h 间隔前温度记录得出; $-\mathbf{V} \cdot \nabla T = -\mathbf{V} \frac{\partial T}{\partial S}$ 为平流变化, \mathbf{V} 为实测风速, $\frac{\partial T}{\partial S}$ 为沿流线方向的温度梯度。

2002 年 5 月 28 日 08 时 850 hPa 等压面图上北京气温 17°C , S W 风 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 27 日 08 时 850 hPa 等压面图上北京气温为 14°C , γ 为 $-0.8^\circ\text{C}/100 \text{ m}$, $\frac{\partial T}{\partial S}$ 为 $-0.2^\circ\text{C}/410 \text{ km}$ 。可算出 28 日 08 时 850 hPa 北京上空上升气流为 $39.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由中国气象科学研究院研制已在北京市人工影响天气办公室运行的“强对流天气预报平台”中, 已

提供了相关的产品可供作业时机选择时参考。其中剖面图分析模块可提供 $97.3^{\circ} \sim 132.6^{\circ} \text{E}$, $50.5^{\circ} \sim 31.1^{\circ} \text{N}$ 之间 15 个纬向垂直剖面资料,显示 100hPa 以下 u 与 ω 合成风矢量, 0°C 层高度线, 700hPa θ_{se} 线和大气层稳定度资料。垂直速度图显示从 1000 ~ 200hPa 间距 50hPa 的 16 层等压面上华北地区垂直速度大小及上升或下沉气流区。图 5 为 2002 年 5 月 28 日 08 时 850hPa 华北地区垂直气流分布图,从图 5 中可看出垂直气流区尚在北京西北部(黑线内)地区,北京尚无明显上升气流。图 6 为 43°N 一线的垂直剖面图,图 6 中显示垂直气流分布情况。从图 6 中尚可看出 0°C 层在 3000 m 以上,北京北部地区上空不稳定。以上产品对 AgI 发生器增水作业时选择有重要作用。但主上升气流区何时能进入北京,须使用多普勒雷达进行判定。

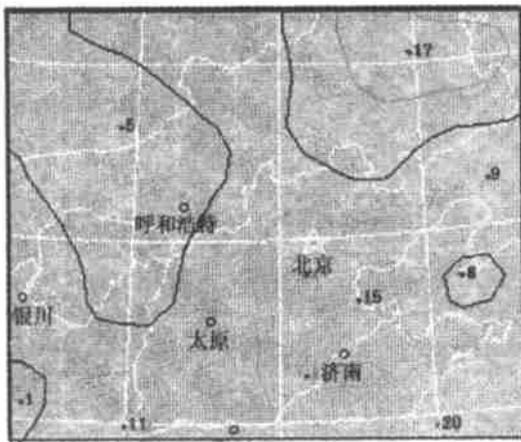


图 5 2002 年 5 月 28 日 08 时 850hPa 垂直速度

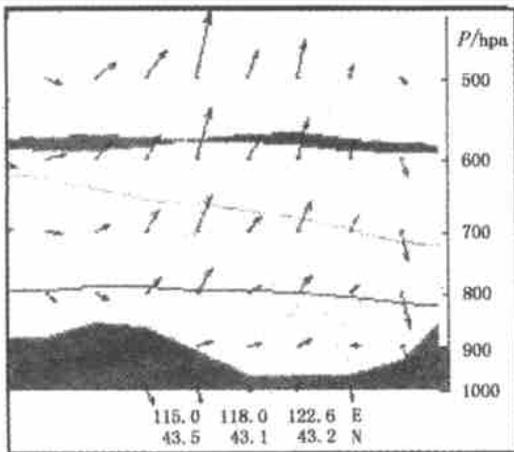


图 6 垂直剖面图

3.3 利用多普勒雷达回波选择作业时机

多普勒雷达的使用,可以及时了解作业区域垂直气流情况。图 7 为 3830 多普勒雷达 2002 年 5 月 28 日 13:30 所观测到的 150km 档平面速度场资料,图 8 为同时刻雷达平面强度场资料。从图中可看出此时刻北京存在明显的 NW 和 SW 风的辐合带,径向气流速度均为 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。低层风辐合必然形成上升气流,此辐合带直到 15:58 才移出北京。此时设置在海淀区的 AgI 发生器作业最为有利。可以有 2h 左右的作业时间。

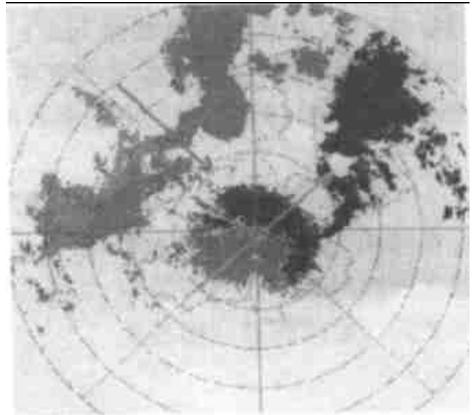


图 7 多普勒雷达 PPV 速度场
(13:30:35, 仰角 2.3° , $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

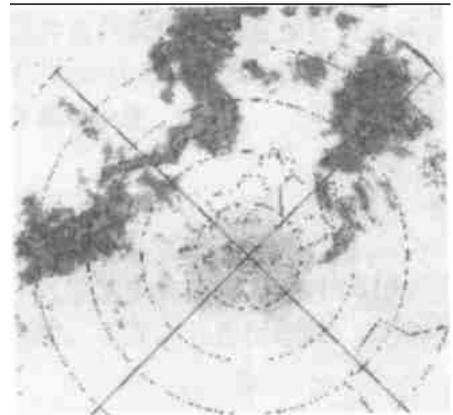


图 8 多普勒雷达 PPI 强度场
(13:30:38, 仰角 2.3° , 25dBz)

根据多普勒雷达垂直风场(RHV)资料,更能直观了解垂直气流情况。

3.4 作业时机选择工作流程

综上所述, AgI 地面发生器作业时机选择可多种方法综合应用,可选用以下工作流程:

①根据 08 时天气图判断作业区是否有可能出现上升气流,即有没有作业的可能性;

②根据强对流天气预报平台垂直气流和剖面图产品确定上升气流区位置和粗估其大小；

③依据每小时一张的卫星云图资料可大致确定不同时冷锋移动速度和位置；

④具体作业时间应根据多普勒雷达 PPI 强度资料提供的降水回波位置和移向, PPV 和 RHI 提供风场资料确定。

4 发生器设置位置的选择

AgI 发生器在山上的架设位置十分重要,应尽量选择山顶迎风坡架设,这样地形对气流的抬升作用有助于在低层形成上升气流。一般不要把发生器架设在孤立山顶上,过山下沉气流不利于催化剂向上扩散。

有条件的应在待选作业点进行三轴风标、平飘球等扩散观测实验,或进行数值模拟,以弄清在不同天气形势下地形对垂直气流的影响,为架设点的选择提供依据。作业点可安装测垂直气流观测仪器,在以上大条件满足情况下,准确选择作业时间,以保证催化剂顺利上升至摩擦层之上。

作业点应安装可靠的避雷装置和防火工具,以保证人员和设备安全。

5 结语

(1) AgI 地面发生器作为飞机、火箭等增水作业的补充技术有成本低、指挥环节少和不受空域限制的优点。把发生器设置在山体迎风坡更有利于催化剂进入云中适当部位。

(2) 根据点源扩散方程计算结果,冬半年零度层低于 3000 m 以下更适合 AgI 地面发生器作业,而夏半年作业有一定难度,如果作业时机选择在上升气流旺盛时段也可保证适量的催化剂进入 0℃ 层以上,此方面尚需进一步研究。

(3) AgI 地面发生器增雨(雪)作业技术关键是作业时段的选择,应选择在上升气流区,天气图、云图、多普勒雷达资料均可作为作业时机选择依据。自动运行的“强对流天气预报平台”提供的垂直速度和剖面图资料使作业时机选择更加直观和快捷。

参考文献

- 1 鄂大雄. 燃烧 AgI 丙酮溶液产生冰核气溶胶. 气象, 1991, 17(3): 3 - 7
- 2 申亿铭. 云中催化剂的扩散. 北京: 气象出版社, 1994. 117 - 119
- 3 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 1992. 872 - 879

THE FEASIBILITY AND OPPORTUNITY OF PRECIPITATION ENHANCEMENT BY AGI GENERATOR ON THE GROUND

Qin Changxue Yang Daoxia Jin Yongli

(Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089, China)

Abstract: One key technique of precipitation enhancement by AgI generator established at the windward side of the hill is to choose the occurring and lasting time of updrafts, which affect the rate of the valid nuclei into clouds. The feasibility of precipitation enhancement by AgI generator on the ground is analyzed. Using synoptic chart, satellite cloud picture, radar echo, and precipitation parameters, the technique of determining operating opportunity is discussed.

Key words: ground-based, precipitation enhancement, updrafts, selection of operating opportunity