

人工增雨试验中的反效果问题*

叶家东 范蓓芬

杜京朝

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

(江苏省气象台, 南京 210008)

提 要

该文对人工增雨试验中出现的反效果(减雨)现象及其发生的条件和原因作了概要的评述和分析。根据实例分析,指出人工增雨作业中不适当的催化对象、不适当的催化剂和催化剂用量以及不适当的催化部位和催化时机都有可能导致无效或减雨的反效果。在开展人工增雨作业时,应力求在作业有关的各环节提高科学性、减少盲目性,以提高人工增雨实效。文章还简要探讨了人工削弱局地暴雨的可能性,指出这是一个值得认真探索的具有重大潜在社会和经济效益的研究领域。

关键词: 人工增雨 人工减雨 静力催化 动力催化

引 言

云物理学中通常将地面降水速率与通过云底输入云系的水汽通量之比或地面降水量与云的凝结水量之比定义为云或云系的降水效率。不同的云降水效率差异很大,例如:孤立冰雹云为3%,小雷暴云20%,飑线系统40%~50%,冷锋云系60%,地形性对流雨带25%,低空雨带30%,高空雨带则为70%~80%。可见,地形性云、低空雨带、小雷暴云和孤立冰雹云的降水效率都较低,其中大量云水不能及时转变成有效的降水,而在空中流失或蒸发掉。人工增雨的静力催化着眼于提高云的降水效率以增加降水,而动力催化则着眼于增加入云的水汽通量。

静力催化原理假设:①冷云降水是由冰晶发动并通过“水-冰”转化的贝吉隆过程及随后的淞附或碰并过程完成的;②有些云降水效率不高或根本无降水是因为自然云中缺乏足够的冰晶;③通过播撒干冰或碘化银等冷云催化剂的人工引晶技术可弥补冷云中自然冰晶不足,促使降水过程得以有效地发动而达到增雨目的。

动力催化原理假设:①在孤立积云的过冷却部位过量播撒冷云催化剂(冰核浓度达 $10^2 \sim 10^3$ 个/L),使过冷水云迅速冰晶化,并释放冻结潜热,增大云的浮力,空气加速上升,云体增高变大,生命期更持久,从而预期会降更多的雨;②对积云群体实施过量播撒,促使云体合并,有可能大大增加区域雨量。观测表明,两块或两块以上积云合并,总

* 本文得到国家自然科学基金项目 49575243 号资助。
1996-12-21 收到, 1997-06-29 收到修改稿。

降雨量可比孤立积云增大一个数量级以上;另外动力催化后的云在强化降雨的同时,也增强降水引起的下沉冷湿气流,它能加强阵风锋并促进邻近地区激发新的对流单体甚至有可能促使对流风暴系统激发成为自传播系统,从而延长对流风暴系统的生命期、增加总降水量。

不论是静力催化还是动力催化的原理假设,都附有一系列有利于播云的限制性条件,即“可播性”条件。静力催化的“可播性”条件包括:①冷云部分有较丰富的过冷液态水含量;②过冷云区自然冰晶较少,云顶温度一般介于 $-10\sim-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间(播云“温度窗”);③云层较厚,而云底温度又不宜太高,云中大水滴较少,水滴碰并及冰晶繁生效率均较低。动力催化除了要求冷云有较丰富的过冷液态水含量外,还要求条件性不稳定层厚,云底暖,云上气层有弱稳定层覆盖,抑制自然对流发展等“可播性”条件,通常用一维积云数值模拟试验得出云的“可播度”表征。这些条件中的任何一条或数条不满足,就可能导致人工播云作业无效或产生反效果——减少雨量。

1 历史上人工增雨试验中的反效果现象

1.1 静力催化试验

一些建立在静力催化概念基础上的随机化播云试验表明在一定条件下播云会导致无效或减少降雨的反效果,虽然统计显著度不高,但已引起人们对云的“可播性”引起警觉和重视。例如:

(1) 亚利桑那山区积云试验^[2]:1955~1960年和1961~1964年期间在美国亚利桑那州开展的成对试验日随机化地形性积云播云试验。在目标区上风方飞机在云底下300~600 m高度沿垂直于风向的48.3 km长的播云线播云。统计效果为雨量减少约30%(播云日降水量/非播云日降水量=0.70),统计显著度不高($\alpha=0.16\sim0.30$)。人工播云未能使降雨量增加,产生这种结果的可能原因是该地区山地积云云底温度较高,云中诱降水可能主要通过暖雨过程,无需冰晶过程启动。

(2) 白顶计划^[3]:1960~1964年在美国中西部密苏里州南部对夏季非地形性积云进行的按试验日随机化设计的飞机播云试验,飞机在云底下播撒AgI(播撒率2700 g/h)。分层统计结果表明,对云顶高度在6096~12192 m(相应的云顶温度 $-10\sim-45\text{ }^{\circ}\text{C}$)的云有正效果;对云顶高度低于6096 m或高于12192 m的云,播云使降水减少。播撒日总降水量减少约20%,统计显著度 $\alpha=0.13$ 。所提出的物理解释是密苏里夏季大部分积云可在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层以下的暖区通过碰并形成雨滴,它们被上升气流夹带至 $-5\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区就冻结成冰粒并有可能促进冰晶繁生作用。这些冰粒尺度达 $10\sim300\text{ }\mu\text{m}$,数浓度可达 $10^4\sim10^5$ 个/ m^3 ,这正是播云作业希望达到的浓度。所以人工播撒额外的AgI会造成过量播撒而导致降水减少。

(3) 克里麦克斯试验 I 和 II^[4,5,6]:1960~1965年和1965~1970年冬季在美国科罗拉多州落矶山区对地形性云进行了两次按试验日随机化设计的地面播撒AgI烟的播云试验(Climax I和II),试验效果按500 hPa温度(作为试验日平均云顶温度指标)进行分层统计,当500 hPa温度为 $-20\sim-11\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-26\sim-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-39\sim-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,相对增雨

值分别为：75% ($\alpha=0.045$)，10% ($\alpha=0.35$)，-11% ($\alpha=0.15$)。对上述播云效果的物理解释是云顶温度介于-10~-20℃时，自然冰质点浓度常常低于降水所需要的浓度，人工播云增雨可能性大(称之为可播云的“温度窗”)；云顶温度<-24℃时，自然冰相效应有效，无人工增雨潜力；云顶温度<-28℃时，播云后一般降水会因过量播撒而减少；云顶温度 ≥ -10 ℃的暖底云，需考虑冰晶繁生机理的作用，不过冬季这类云出现机会较少。近20年来Hobbs和Rangno等人对Climax试验的执行、效果分析及其解释提出一系列批评^[7~11]，指出：落矶山地区云中冰质点浓度与云顶温度或大气冰核浓度关系并不大，云顶温度 ≥ -20 ℃时也常观测到高的冰质点浓度；以500 hPa温度作为落矶山上空冬季地形性云的云顶温度的指标根据不足，自然降雨量也并不随500 hPa温度增高至大于-20℃而减少；试验中可能并没有严格地执行原定的随机化设计方案；应用商业部公布的雨量资料对试验结果进行再分析表明，500 hPa温度 ≥ -20 ℃时并无显著增雨效果等等。对这些批评中某些论点，试验者和旁观者尚有不同看法^[12, 13]。Climax试验是60年代开展的早期试验，设计、执行和分析中可能有些粗糙，例如以500 hPa温度代表变化的该日平均云顶温度会出现较大误差，试验者也在考虑采用3 h时段作为试验单元进行再分析，试图弥补日雨量单元所引发的缺陷。

(4) 澳大利亚播云试验^[14, 15]：澳大利亚是严重干旱缺水的地区，早在50和60年代就开展过一系列飞机人工播云增雨试验，采用14日周期或1日周期的随机化设计方案，飞机在积云底高度(层状云是-5~-10℃高度)播撒AgI烟。试验效果显示出相当大的变异性，视目标云和大气条件而异，即使同一试验，效果也有逐年变差的趋势。例如：斯诺伊山区试验头两年增雨26%，统计显著，随后就不显著；新英格兰地区试验头一年增雨30%，统计显著，第二年以后不显著；瓦拉刚巴地区试验无效；南澳大利亚地区则有负效果；稍后在塔斯马尼亚进行的隔年随机试验则表明秋、冬季增雨15%~20%，春、夏季无效。针对上述播云效果分析气象原因表明，大陆性气候下冰晶过程在降水形成中起重要作用，播云效果好，但增雨效果有逐年变差趋势，原因不明；海洋性气候下暖雨过程作用大，播云效果差或为负效果。

(5) 以色列人工增雨试验^[16~21]：1961~1967年和1969~1975年冬季(11月~4月)在以色列进行了两次按区域随机交叉设计方案进行的飞机人工增雨试验(以色列I和II)。两个试验除目标区设置有些改动外，其余均相似。以色列I试验统计效果为北目标区和中目标区两区平均增雨15%，统计显著度 $\alpha=0.009$ ；以色列II采用随机交叉设计双比分析全区的平均效果为-2.5%，统计不显著，而当利用一北控制区对北目标区单独分析时有13% ($\alpha=0.028$)的增雨效果。南区由于缺少相应的控制区，难以单独分析南目标区的播云效果。为此在1976~1991年对南区单独进行了一次区域控制随机试验(以色列III)^[19]，对682个试验日统计分析的估计效果是-4.5% ($\alpha=0.42$)，表明无任何显著效果；同期在北区进行了业务播云试验^[20]有6%~11%的增雨效果，统计显著度 $\alpha=0.02$ 。近年来一系列分析研究表明^[18~21]，不同的气象条件包括沙尘、气流轨迹和天气系统等对以色列的播云效果有重要影响，特别是沙尘的影响尤为明显。对以色列I的北目标区，按尘霾指数进行分层统计，对202个“非尘日”增雨26%，而其余182个“尘日”则减雨2%，但不显著。对以色列III和对应的北区业务作业，按沙尘分层统计的增雨效果

列于表 1.

表 1 以色列 III 随机试验(南区)和北区业务作业增雨效果(%)

	以色列 III (南区 S)			业务作业(北区 N)		
	S	SN	SS	N	NN	NS
尘日	-6	-10	1	6	10	3
非尘日	5	13	1	12	16	10

注: SN、SS、NN、NS 分别表示 S 和 N 区中的北、南分区.

由表可见,非尘日的增雨效果 NN 为 16%,NS 为 10%,SN 为 13%,而 SS 为 1%;尘日在北区(NN 和 NS)播云效果要比非尘日减少 5%~7%,而在 SN 分区则要减少 23%(由增雨 13%变至减雨 10%),SN 分区对沙尘指数最为敏感. SS 分区,不论何种类型的日子都无播云效果.物理解释是以色列沙漠尘埃是一种很好的冰核源,高冰核浓度与高气溶胶浓度密切相关,以色列南部接近沙漠,偏南或西南气流影响时,从撒哈拉—阿拉伯沙漠吹来的沙尘提供丰富的冰核,能与播云剂“竞争”,从而对播云效果起到一种抑制或削弱作用.以色列的沙尘从南向北减少,这与播云效果从北向南变差相匹配.

70 年代以来,以色列试验被认为是既有统计显著的增雨效果又有较为合理的物理解释的人工增雨试验.但近年来这一观念受到严峻的挑战^[22, 23].文献[22]对以色列 I 和 I 的统计结果进行再分析,发现相应的目标区统计显著的“增雨”效果实际上很可能只是降水的巨大时空分布不均匀性所造成的一种假象.云的物理结构分析也表明,试验者原先认为的以色列云有相当一部分是半永久性的过冷水云,在云顶温度介于 -12~-21 °C 之间时冰质点浓度低于 10 个/L 以及滴小、谱窄、高浓度和缺乏冰晶繁生条件等并不确切.有证据表明以色列云在云顶温度接近 -10 °C 时就会产生大云滴和毛毛雨滴,并有较高浓度的冰质点和降水. Rosenfeld 和 Farbstein(1992)^[18]提出在以色列的云中有一半左右在较高的云顶温度下含有较多的自然冰质点是由于沙尘或霾引起的,此时人工播云可能真的减少了雨量,对这一点 Rangno 和 Hobbs^[22]并不持异议,虽然他们尚未认可这种可能的减雨效应是由于沙尘或霾引起的.

(6) 福建古田人工增雨试验^[24, 25]: 1974~1986 年 4~6 月份在福建古田水库流域,进行按区域控制随机设计方案的地面高炮或小火火箭发射 AgI 弹催化的人工增雨试验,其效果平均增雨 23.8%,统计显著度 $\alpha=0.01$;按回波顶温度分层统计:回波顶温度 $T>-5$ °C 时效果不显著, T 介于 -5~-10 °C 时增雨 43.6%,效果最佳, T 介于 -10~-15 °C 时增雨 27.2%,效果次好.催化效果有随对比区自然雨量增大而变差的趋势,大雨时的增雨效果不显著.限于条件,古田试验没有取得空中云微物理结构资料佐证地面播云效果,但地面自然冰核观测表明在 -12~-15 °C 时活化冰核浓度为 $10^{-1}\sim 10^0$ 个/L,浓度不足,影响降水效率;催化后地面雨水中 Ag^+ 含量峰值出现时间与地面雨强峰值时间大体同步,这在一定程度上支持了播云的统计效果.

1.2 动力催化试验

建立在动力催化概念基础上的一些随机化播云试验也表明在一定条件下播云可能无效或产生减雨的反效果,例如:

(1) 南达科他州来皮德(Rapid)计划^[26, 27]: 1966~1968年在美国南达科他州进行了一次动力催化播云试验, 按区域随机交叉试验设计方案, 飞机在云底上升气流区播撒 AgI 烟(播撒率 300 g/h)。试验结果对整个大区域(13730 km²)而言, 目标区雨量减小。按天气条件分类统计发现: 阵雨日人工播云可增雨 1 倍多, 统计显著度达 0.05; 雷雨日当高空西北风时, 总雨量减少; 而当高空西南风时, 催化目标区雨量减少, 但下风方 32 km 处增雨。对大区域总雨量减少的物理解释是目标区对流因催化而加强, 四周有附加的补偿下沉运动, 抑制新的对流发展, 从而引起区域降水减少, 这种效应在扰动天气下(雷雨日)尤为明显, Dennis 和 Koscielski^[26]称之为“动力污染”。

(2) 南达科他州捕云机计划^[28]: 1969~1970年对美国南达科他州(北部大平原)积云实施浮动目标区随机试验, AgI 播撒率与来皮德试验相仿(10² g/h), 在动力催化中属于轻量播撒方案, 目的是使人工冰晶化引起降水效率降低的效应有所缓解。雷达观测表明单体积云试验增雨达 40%, 统计上接近显著。协变量分析表明, 降雨量的增加与云顶高度增加关系不大, 而与降水效率增加有关, 原因可能是 AgI 主要催化阵密云附近的新云塔, 它们的空间尺度和总降雨量均有所增加, 但该区域云的最大高度不一定增加。

(3) 佛罗里达单体积云动力催化试验^[29]: 1969~1970年在美国佛罗里达州南部地区开展对单体积云块随机化试验, 在目标云过冷却区投射 AgI 焰弹。由雷达观测估算催化效果, 发现单体积云降雨量增加 2 倍。按天气条件分层统计表明: 晴好天气催化云的增雨量大, 统计显著度高; 阴雨天或天气扰动日增雨量小或为负值。这种天气催化云水平伸展较小, 生命期也较短。对扰动日催化效果差的解释是天气扰动日自然对流旺盛, 动力催化后较早形成的雪花和霰粒被人工催化动力效应增强了的上升气流输送进入云砧中流失掉, 而不能形成有效的降水, 至少不能形成局地强降水。

(4) 佛罗里达 FACE 计划^[30]: 1970~1971年在美国佛罗里达进行一次旨在促进积云群合并以增加区域雨量的佛罗里达区域积云试验(FACE), 按随机化试验日设计, 飞机投射 AgI 焰弹对目标云进行动力催化, 结果表明动力催化在有利条件下能够促使邻近积云合并, 按浮动目标区分析平均增雨量达 3 倍, 但若按固定目标区的降雨量估算, 试验基本无效甚至有负效果。分析提出两种可能的动力污染: ① 对强大的对流云动力催化, 上升气流增强结果会对云外围地区产生额外的补偿下沉效应, 从而导致区域雨量减少; ② 动力催化一块对流云使其暴发性增强, 其云砧可覆盖数千平方公里, 因遮挡太阳辐射而使其下风方的积云活动消失, 抑制降水。

至今为止, 虽然动力催化试验对孤立的单体积云的生长有一定的动力效应并在一定条件下能使单体积云增加雨量, 但对区域降雨量的效果却并不肯定。相反, 有迹象表明区域雨量会有所减少。近年来在美国得克萨斯州西部进行的试验表明对复合型多单体系统的雨量和云生长有正的动力催化效果^[31], 但在伊利诺斯 PACE 计划的探索性外场动力催化试验中^[32], 却发现用 AgI 进行动力催化的暖底浓积云比用作对比试验的云生长得略低些, 水平尺度、雷达反射率和雨水通量都稍微小些, 显示出一定的负效应迹象, 不过, 采用不同的方法评估结果稍有差异^[33], 但总的效果并不显著, 这从一个侧面说明, 动力催化引起的各种动力效应有时是互相抵触的, 从而使最终的地面降雨效果变得捉摸不定。再加上降水本身的巨大时空变率, 使得催化效果难以鉴别。

2 人工增雨试验中减雨的可能机理

(1) 不适当的播撒对象：云顶过冷($< -24\text{ }^{\circ}\text{C}$)，自然冰晶充裕；播云有利云顶温度窗为 $-10\sim -24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；云底过暖，暖层较厚，大滴多，冰晶自然繁生机制活跃；暖雨过程在雨滴形成中起主导作用。

(2) 不适当的播撒部位和不适当的催化剂：暖云部位播撒大量小凝结核，会提高云的胶性稳定度，抑制暖雨过程。

(3) 不适当的播撒时机：夏季积云发展早期播云可以提早降水，但时机未成熟的降水会破坏上升气流，云的自然增长会受到抑制或过早发生逆转，缩短云的生命期，有时反而会减少雨量。

(4) 不适当的催化剂量(过量播撒)：在对流云(特别是雷暴云或冰雹云)的过冷却区过量播撒成冰核，云迅速冰晶化，释放冻结潜热加强对流的同时也将延缓冰质点凇附增长过程，大量小冰晶被夹带至云砧区在高空向四周流散而削弱局地降水。

(5) 动力污染效应：① 由于动力催化，对流加强，相应地在云四周产生范围较广的补偿下沉运动，抑制邻近地区对流活动，从而导致区域雨量减少；② 动力催化一块条件有利的积云使其爆发性增长，其云砧可覆盖数千平方公里，因遮挡太阳辐射而使其下方的层结稳定化导致积云活动消失，抑制区域降水。

从上述分析可以看出，人工增雨作业在催化对象的选择、播撒方案的制定(包括播撒时机和播撒部位的确定)以及催化剂量的控制等方面都要力求符合播云原理假设所限定的可播性条件，方能使作业达到预期的增雨目的，不问天气和云层结构条件就随意作业，难免会出现事与愿违的无效或减雨的反效果。

众多的迹象表明，人工增雨试验中的反效果现象常常出现在云的自然降水条件比较有利的场合，从这里人们得到一个契机，能否利用这种反效应，在多雨季节或地区进行人工减雨特别是人工削弱或抑制局地暴雨以减轻洪涝灾害的试验呢？这是一个新的思路，由于这种试验同样具有重大的潜在社会和经济效益，特别在我国东部暴雨频繁发生的经济发达地区更是如此，所以是一个值得认真探索的研究领域。

3 人工增雨试验中减雨的可能途径

当前人工增雨的基本思想是在合适的天气条件下，用恰当的和适量的催化剂，在最佳的时机播撒到云的最佳部位以获得预期效果。在这种状态下，降水潜力得以最大限度发挥出来，降水效率最高。而人工减雨的指导思想是设法破坏云的良好自然降水状态或过程，使其失调，从而降低降水效率；或使云提早降水，未老先衰；或延缓降水过程使降水在空间再分布。抗旱面临的最大困难是常缺乏合适的播云对象，减雨或降水空间再分布有试验对象，主要问题是能否影响和如何影响。可能的途径包括^[34]：

(1) 截流效应 在认清暴雨天气前期环流形势基础上，在中尺度水汽和能量供应主通道上提前激发对流过程，使较多的水汽和能量消耗在对流降水活动的过程中，削弱低

层向暴雨区输送的水汽、动量和感热通量。这是一种釜底抽薪的策略，方法类似于削弱台风的试验。

(2) 竞争场效应 在预期的暴雨区提前进行动力催化，人为促使动力污染效应发挥作用，并对大量较小的积云催化，促使它们“早熟”以削弱其“后劲”，不让水汽和能量在低层充分积聚以达到减雨的目的。

(3) 降水空间再分布效应 在沿海暴雨频发地区有利地形条件下对暴雨期(如前汛期和梅雨期)海洋性对流云团的暖云区过量播撒小 CCN，使云大陆化，增加云的胶性稳定度，延缓暖雨形成过程；在冷云区过量播撒人工冰核，增加冻结潜热并延缓冷雨形成过程，使较多云冰质点输入高空云砧区而散布到下游海洋上，从而达到削弱沿海地区局地暴雨强度的目的。现阶段主要从数值模拟试验角度探讨这种方案的可行性。对暖雨过程进行的二维数值模拟试验初步结果表明^[35]，改变 CCN 浓度能影响暖雨过程和最终的降雨量及其分布。CCN 从 300 cm^{-3} 增至 1000 cm^{-3} 或 2000 cm^{-3} ，最大累积雨量可减少 20% 至 30% 左右。这项试验尚在继续之中。

参考文献

- 1 游来光. 我国人工影响天气的历史现状和面临的某些科学问题. 《人工影响天气》(一), 国家气象局科教司, 中国气象学会大气物理委员会, 1988. 23~25.
- 2 Battan L J. Relationship between cloud base and initial radar echo. *J. Appl. Meteor.*, 1963, 2: 333~336.
- 3 Braham R R Jr and Flueck J A. Some Results of the Whitetop experiment, Preprints of Second National Conference on Weather Modification, 1970. 6~9, 176~179.
- 4 Grant L O, Chappell C F and Mielke P W Jr. The Climax experiment for seeding cold orographic clouds. Proceedings of International Conference on Weather Modification. Canberra, Australia, 1971. 78~84.
- 5 Mielke P W, Grant L O and Chappell C F. An independent replication of the Climax wintertime orographic cloud seeding experiments. *J. Appl. Meteor.*, 1971, 10(6): 1198~1212.
- 6 Grant L O, and Kahan A M. Weather modification for augmenting orographic precipitation. Weather and Climate Modification. Hess, W N ed., Wiley-Interscience, 1974. 282~317.
- 7 Hobbs P V and Rangno A L. Comments on the Climax randomized cloud seeding experiments. *J. Appl. Meteor.*, 1979, 18: 1233~1237.
- 8 Hobbs P V. Lessons to be learned from the reanalysis of several cloud seeding experiments. Preprints of Intern. Cloud Physics Conf., Clermont-Ferrand, France, Amer. Meteor. Soc., 1980. 88~91.
- 9 Rangno A L and Hobbs P V. A re-evaluation of the Climax cloud seeding experiments using NOAA published data. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1987, 26: 757~762.
- 10 Rangno A L and Hobbs P V. Further analyses of the Climax cloud-seeding experiments. *J. Appl. Meteor.*, 1993, 32: 1837~1847.
- 11 Rangno A L and Hobbs P V. Reply. *J. Appl. Meteor.*, 1995, 34: 1233~1238.
- 12 Mielke P W Jr. Comments on the Climax I and II experiments including replies to Rangno and Hobbs. *J. Appl. Meteor.*, 1995, 34: 1228~1232.
- 13 Gabriel K R. Climax again? *J. Appl. Meteor.*, 1995, 34: 1225~1227.
- 14 Smith E J. Cloud seeding experiments in Australia. Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 1967, 5: 161.
- 15 Smith E J, Adderley E E, Veitch L and Turton E. A cloud-seeding experiment in Tasmania. Proceedings of the International Conference on Weather Modification, Canberra, Australia, 1971. 91.

- 16 Gabriel K R. The Israeli Rainmaking experiment 1961~1967. final statistical tables and evaluation. Tech. Rep., Jerusalem, Hebrew University, 1970. 47.
- 17 Gagin A and Neumann J. The second Israeli randomized cloud seeding experiment: Evaluation of the results. *J. Appl. Meteor.*, 1981, **20**: 1301~1331.
- 18 Rosenfeld D and Farbstein H. Possible influence of desert dust on seedability of clouds in Israel. *J. Appl. Meteor.*, 1992, **31**: 722~731.
- 19 Nirel R and Rosenfeld D. The third Israeli rain enhancement experiment—an intermediate analysis. Proceedings, Sixth WMO Sci. Conf. Wea. Mod., Paestum, Italy, 1994, **I**: 569~572.
- 20 Nirel R and Rosenfeld D. Estimation of the effect of operational seeding on rain amounts in Israel. Proceedings, Sixth WMO Scientific Conference on Weather Modification, Paestum, Italy, 1994, **I**: 573~576.
- 21 Levi V, Rosenfeld D and Herut B. Relationship between the occurrence of dust, ice nuclei concentrations and rain chemical composition in Israel. Sixth WMO Scientific Conference on Weather Modification, Paestum, Italy, 1994, **I**: 565~568.
- 22 Rangno A L and Hobbs P V. A new look at the Israeli cloud seeding experiments. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**: 1169~1193.
- 23 Dennis A S. Changing perceptions of the Israeli weather modification program. *J. Wea. Mod.*, 1996, **28**: 83~85.
- 24 Yeh Jiadong, Cheng Keming and Zeng Guangping. Randomized cloud seeding at Gutian, Fujian, China. *WMA, J. Wea. Modif.*, 1982, **14**: 53~60.
- 25 Zeng Guangping, Xiao Feng, Fang Shizeng and Yeh Jiadong. Rainfall results of the Gutian area cloud seeding experiment 1975~1984, China, Reprints, Fourth WMO Scientific Conference on Weather Modification. WMP Report 1985, **1**(2): 513~518.
- 26 Dennis A S and Koscielski A. Results of a randomized cloud seeding experiment in South Dakota. *J. Appl. Meteor.*, 1996, **8**: 556~565.
- 27 Dennis A S and Schock M R. Evidence of dynamic effects in cloud seeding experiments in South Dakota. *J. Appl. Meteor.*, 1971, **10**: 1180~1184.
- 28 Dennis A S and Koscielski A. Height and temperature of first echoes in unseeded and seeded convective clouds in South Dakota. *J. Appl. Meteor.*, 1972, **11**: 994~1000.
- 29 Woodley W L. Precipitation results from a pyrotechnic cumulus seeding experiment. *J. Appl. Meteor.*, 1970, **9**: 242~257.
- 30 Simpson J and Woodley W L. Seeding cumulus in Florida; new 1970 results. *Science*, 1971, (172): 117~126.
- 31 Rosenfeld D and Woodley W L. Effects of cloud seeding in west Texas. *J. Appl. Meteor.*, 1989, **28**: 1050~1080.
- 32 Czys R R, Changnon S A, Westcott N E, et al. Responses of warm-based, mid-western cumulus congestus to dynamic seeding trials. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**: 1194~1214.
- 33 Changnon S A, Gabriel K R, Westcott N E and Czys R R. Exploratory analysis of seeding effects on rainfall, Illinois 1989. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**: 1215~1224.
- 34 叶家东. 关于人工抑制暴雨问题. 南京气象学院学报, 1993, **16**(3): 373~378.
- 35 王春明, 叶家东, 魏绍远. 气溶胶对暖雨过程影响的数值模拟试验. 《第12次全国云、降水物理和人工影响天气科学讨论会》, 中国气象学会学术会议文集 CPWM-012号, 1996. 79.

STUDY OF NEGATIVE EFFECTS IN ARTIFICIAL PRECIPITATION ENHANCEMENT EXPERIMENTS

Ye Jiadong Fan Beifen

(Dept. of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Du Jinchao

(Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008)

Abstract

The evidence of negative effects in the artificial precipitation enhancement experiments in the past and the caused conditions and reasons have been analysed and reviewed briefly. It is shown that the zero or negative effects may be caused by the unsuitable synoptic situation and cloud selection criteria, inappropriate seeding agent and delivery technique. Therefore, the suitable targeting cloud selection, appropriate seeding agent and delivery technique in the cloud seeding operations are needed for precipitation enhancement. The possibility of crippling local heavy rain artificially has been also explored based on the inspiration from the appearance of negative effects mentioned above, showing that is an interesting research field with great potential social and economical benefits.

Key words: Artificial precipitation enhancement Artificial precipitation reduction Static seeding Dynamic seeding