

人工影响天气

李大山 主编

2003年4月



目 录

第一章 绪论	1
1.1 人工影响天气的发展历史	1
1.2 人工影响天气的科学基础	17
1.3 人工影响天气的社会需求和经济、环境影响及社会特征	29
1.4 人工影响天气未来发展前景	32
第五章 云与降水物理探测	207
5.1 机械常规测量	208
5.2 机械云微物理测量	209
5.3 机械遥感探测设备	217
5.4 地基常规探测	219
5.5 地基雷达探测	220
5.6 其他遥感探测设备	221
第六章 人工影响天气的催化技术	223
6.1 人工影响天气的催化剂	223
6.2 人工冰核成冰性能的云室检测	237
6.3 人工影响天气催化剂运载工具概述	245
第十四章 相关法规、科技界的论证与声明(附录)	565
14.1 《中华人民共和国气象法》中关于人工影响天气的相关法令	565
14.2 关于人工影响天气的国家行政文件	566
14.3 国家行政法规《人工影响天气管理条例》	566
14.4 世界气象组织(WMO)关于人工影响天气现状与发展的重要文件	568
14.5 1992年世界气象组织(WMO)对于人工影响天气现状与发展的论述	575
14.6 中国气象界对人工影响天气现状与发展的论述	581

第一章 绪 论

1.1 人工影响天气的发展历史

1.1.1 科学人工影响天气开创时期

1.1.1.1 早期人类对人工影响天气的渴望和先民的探索活动

呼风唤雨、祛灾避害是人类长期以来梦寐以求的美好愿望。原始人采用符咒、祈祷及各种宗教形式求雨,这种方式甚至一直延续到文明社会。

我国是雹灾较多的国家,民间用土炮消雹的历史可追溯到14世纪后半叶。河北磁县南来村当时曾进行过炮轰雹云的作业。17世纪刘献庭(1648~1695)在《广阳散记》中曾记载甘肃“夏五、六月间常有暴风起,黄云自山来,风亦黄色,必有冰雹。……土人见黄云起,则鸣金鼓,以枪炮向之施放,即散去”。清咸丰年间(1857)出版的《冕宁县志》中,在记述了土炮轰击雹云的事件后,还介绍我国北方火枪消雾的情景。志中有“北人御雾,以枪向雾头施放,其雾渐薄。”冕宁民间的土炮防雹一直延续到20世纪50~60年代^[1]。

在欧洲,意大利(1815)曾总结民间防雹措施,包括教堂敲钟、打炮、爆炸、生大篝火等。

首次有科学根据的人工降雨建议是气象经典著作《风暴原理》(1841)的作者美国 Espy (1839)提出的。他认为在潮湿空气中可用烈火产生上升气流来造云致雨。这种设想是否具体实施尚无记载,但20世纪50~60年代在法国进行的大量快速燃油试验和在刚果对大草原林火的观测取得了某些证据。大气层核武器试验出现的蘑菇云和在一定大气层结条件下可伴有阵雨产生,以及大型炼油厂火灾伴生积云也可作为此设想具有科学根据的佐证。

美国 Powers(1871)在《战争与天气(人工产生雨)》书中,引证南北战争(1861)和普法战争(1870)都曾出现炮击后导致下雨的现象,从而促使国会拨款进行野外试验,甚至引发了一些商业性的所谓人工降雨活动。对这种现象的合理解释,可设想为战争准备通常选在好天气时期,待到战争结束,按温带扰动的自然周期,每3~5天出现一次降雨的概率很高,本来就应该下雨,这是一种自然巧合。

荷兰 Verart(1930)曾用干冰进行播云,不过他当时并未意识到干冰对过冷云催化的作用机制。只有美国 Houghton(1938)在麻省理工学院野外试验站曾用吸湿性物质(CaCl_2)播入暖雾中进行消雾,并获得部分成功。这是首次符合物理原理并获得一定成效的人工影响天气科学试验^[2]。

1.1.1.2 核化作用和成雨机制的研究

19世纪30年代以前云物理的探测、实验和理论研究有了一定积累,它为其后的发展奠定了基础。其中包括美国 Kelvin(1870)导出纯水胚滴表面平衡水汽压与其曲率关系的理论公式。英格兰 Aitken(1881)发明计尘器(后称为 Aitken 核计数器),并以此证实云雾滴中含有凝结核。瑞典 Kohler(1925)发展了吸湿性核的凝结理论并证实了海盐核在成云致雨过程中的重要性。

挪威 Bergeon(1933)根据德国 Wegener(1911)在《大气热力学》一书中关于冰晶水滴共存,水滴蒸发和冰晶凝华增长的明确论述,提出了冰水混合云的降水理论。德国 Findeisen(1938)进一步扩充和完善了这一理论,为解决冷云降水机制奠定了坚实的基础。现在常把它称为 Bergeon-Findeisen 理论,它开创了现代云物理研究的先河。而且 Findeisen 还详细地研究了冰晶形成的方式,认为成冰方式中从水汽直接凝华优于由水滴冻结。他已经考虑此过程中的核究竟是什么,并指出这种核可能是石英晶体,还预见通过引进合适的核有可能激发这种降水机制。

Findeisen 的认识也有局限性,他把云的降水都归结为源于冰晶。其实 Houghton 在前一年就已指出水滴碰并在雨的发展中具有重要作用。其后美国最早的诺贝尔奖获得者 Langmuir(1948)提出大滴破碎链锁效应的假设,对降水形成理论作了进一步的补充。

1.1.1.3 播云催化剂的发现

人工影响天气的科学活动始于 1946 年的美国, Schaefer 和 Vonnegut 发现干冰和碘化银可作为高效的冷云催化剂。1940 年代初 Schaefer 在 Langmuir 的指导下从事过冷却水滴的冻结研究。1946 年 7 月 12 日为了使云室进一步降温, Schaefer 从保温箱中取出一大团干冰投入充满过冷水滴的云室,立即在云室内形成浓密的小冰晶云,这一偶然事例促使 Schaefer 发现干冰作为冷却剂可造成 -40°C 的低温,促使直接形成大量冰晶。

同年 11 月 13 日,在飞行员 Curtis Talat 驾驶的丽婴(Fair Child)单翼机的座舱里, Schaefer 对马萨诸塞州西部 Graylock 山上空的一块过冷层云上部播撒了 3 lb^①干冰,实施了人类首次对过冷云进行科学的催化试验。Langmuir 在地面上观看了催化效果,播撒干冰后 5min 内,几乎整个云都转化成雪,并形成雪幡降落约 2000ft^②后升华消失。

几乎与此同时, Vonnegut 作为通用电气公司实验室研究组成员正从事成核过程的研究工作,受 Schaefer 实验的启示,开始注意冰的成核作用。当他了解到冰晶可在具有与它类似的晶体结构的物质上核化附生接长之后,查阅《X 光晶体手册》,寻找晶体结构与冰晶相近不溶于水的物质,几经周折于 1946 年 11 月 14 日发现纯度较高的碘化银作为成冰异质核的突出效应,可在过冷水滴云中产生大量冰晶。其后 Vonnegut 还在碘化银烟剂发生法研究方面起到了先导作用。

Schaefer 和 Vonnegut 的伟大发现开创了人工影响天气的新时代。

1.1.1.4 人工影响天气活动雨后春笋般地兴起

Schaefer 第一次飞机播撒干冰造成云中产生雪幡的消息,立即在新闻界广为传播。随后在美国联邦政府主持下由通用电气公司联合美国陆军通信兵、空军和海军研究部组织实施《卷云计划》,当时的美国天气局(NOAA 前身)也参加作为顾问。从 1947 年 4 月开始进行飞机在云中播撒干冰的试验,10 月 13 日进行了首次人工影响飓风的尝试,在一个飓风云墙外围的薄层云中,沿一条 160km 长的航线播撒了 36kg 干冰。在 Langmuir 的积极参与下,1948~1949 年先后在中美洲的洪都拉斯对热带云进行了飞机播撒干冰的消云试验(过量催化)和在新墨西哥对积云进行多次播撒干冰试验,并开始使用地面喷射碘化银烟的发生器进行所谓的周期化播撒(1949~1951 年)。

针对 Langmuir 过分热情地鼓吹所谓“天气控制”实际不利于人工影响天气的正常发展。

① lb(磅)为非国际标准单位,其换算关系为:1lb=0.45359237 kg,下同。

② ft(英尺)为非国际标准单位,其换算关系为:1ft=0.3048 m,下同。

美国天气局不得不与之展开争论,并对公众舆论进行疏导,同时于1947年8月作出反应,由自己主持进行两项短期的云物理计划以检验播云效果。经近两年实施的结果,虽未证实播云可产生明显的降水效果,但却从一个侧面证实了卷云计划的结果,即对云播撒后可见到云有明显的发展和变化。

与此同时,随着美国在20世纪50年代初期出现干旱,有一批私营公司掘起,他们在解决水资源不足,积累播云资料以及提供试验场所,提高催化方法的可靠性和适用性方面,起到了积极作用。但在促使原本应该继续深入进行的试验研究过早地转向开发应用方面具有负面影响。有些经纪人至今仍在从事此项业务。

20世纪50年代初期人工影响天气的不少项目受到了 statisticians 们的关注,并首次开始注意科学的试验设计。由美国天气局、陆军、海军和空军联合组成的以著名气象学家 Petterssen 为主席的委员会的指导下,实施了如下计划:

- ①由天气局主持的对与锋面和气旋相关的移动性云系的催化;
- ②在海军研究部主持下由纽约大学进行的对温带气旋的催化;
- ③由空军支持的芝加哥大学进行的对对流云的催化;
- ④消冷性层云和雾,由陆军通信兵工程实验室进行;
- ⑤冰雾物理研究,由空军主办,斯坦福研究所承担;
- ⑥暖性层云和雾的特殊作业系统,由 A. D. Little 公司根据与陆军签订的合同执行。

其间还开展了由 Schaefer 领导的以抑制闪电为目的的《天火计划》。这些计划几乎已涉及到至今仍很活跃的所有人工影响天气领域。或许可以这样说,正是由于 Langmuir 在科学界和民众中享有崇高威望,加上舆论宣传,才使美国政府有关部门超常地投入大量物力财力支持云物理研究和人工影响天气的催化作业。

除美国以外,在世界上许多国家也都比较早地开展了人工影响天气试验。澳大利亚是世界上最干燥的大陆,大部分面积为沙漠,雨量稀少,人工催化降雨的设想对澳大利亚来说具有很大的吸引力。澳大利亚是最早在1947年初就进行了对层积云的飞机播撒干冰作业,Kraus 和 Squires 首先观测到播云使云体向上发展,导致了假设大量播撒干冰可引起低层对流云冰晶化,其释放的潜热提供了附加的浮力使云体上升,此即后来提出动力催化概念的最初构思。其后于1955~1959年实施了用碘化银进行播撒的斯诺伊山区计划,试验获得一定成功。同样严重缺水的以色列其播云活动始于1948年,并在1952年就开始在人工降雨试验中引进了随机化播撒的概念,为其后成功地实施人工降水随机分区窜渡试验奠定了基础。

1.1.2 人工影响天气活动初期有代表性的计划

1946~1947年美国进行的雷暴研究计划,是现代有设计的第一个大规模对积云对流进行综合考察研究的计划。它卓有成效,根据探测资料概括出气团雷暴生命史三阶段模式。这种探索研究方式后来逐步发展完善,形成了大气科学研究方法的一个鲜明特点,即组织大规模的有设计的综合性外场考察、研究、甚至包括施加人工影响的试验计划。在科学的人工影响天气活动初期,有预先设计、目的明确、通过试验获得一定效果的播云增雨、局地降水分布、抑雹、消雾、调制飓风等各个方面的计划达几十个,现将有代表性的计划概述如下:

1.1.2.1 白顶计划

这是一次在美国中西部(密苏里州)产粮区,受美国国家科学基金会支持对夏季对流云进行5年(1960~1964)的播云计划,要求通过播撒碘化银以触发或增强该地区夏季对流云降水。

由芝加哥大学 Braham 指导。试验区以地基雷达为中心,半径为 100km 的范围,按随机数排列成日期顺序进行随机化播撒,碘化银播撒率共达 2700g/h。每一作业日选定一播撒航线,大致与风向垂直,沿试验区上风方一侧延伸 50km,3 架飞机沿航线于平均云底高度(1200m)在 160km 长的播撒线各自来回飞行 6h。适合播撒的选择标准以当日凌晨试验区附近各探空站的总湿度和 1200m 高度的风况为参考。由当地 10 时至次日 02 时每 2h 一次的气球测风资料计算碘化银烟羽从播撒航线向四周的传播范围,按浮动目标和控制区获得烟羽内外,催化日与非催化日的对比资料。试验区降水由雷达和加密雨量站网计算,雷达可确定雨形成的高度从而推断降水是由碰并或由冰晶诱发形成。

统计分析表明播撒区比未播撒区雨量减少,即为负效应。从云物理学飞机探测资料发现,在试验区 $-5 \sim -10^{\circ}\text{C}$ 高度范围自然云中冰晶的尺度为 $10 \sim 30 \mu\text{m}$,浓度为 $10^4 \sim 10^5/\text{m}^3$ 。说明原播云增雨的概念不成立,试验期主要降水为深厚的对流云,其中碰并效率较高,通过繁生过程冰晶浓度已达预期的播撒浓度,人工播云形成过量播撒。白顶计划是最早出现的通过随机化试验获证的产生负效应的播云试验。这一结果促使芝加哥大学研究组再回到研究自然云,并建立了有别于 Bergeron 过程的另一种降水概念模式^[3]。

1.1.2.2 克利马克斯(Climax)计划

Bergeron(1949)最早提出地形云能提供丰富的易受影响的云水资源。在美国西部山区通过播云可能增加降水 10%~15% 的早期试验的基础上,科罗拉多州立大学 Grant 在国家科学基金会的支持下,从 1960 年开始进行一项研究计划,主要目的包括:

- ①人工影响地形云的可能性;
- ②确定可播性的标准;
- ③为当地对地形云的催化提出具体的作业方法。

试验区在 Climax 附近山区,采用随机化方案,研究播撒在地形云中发生的物理过程。分两阶段 Climax I (1960~1965)和 Climax II (1965~1970)实施,后者基本上是对前者的独立重复。试验单元时间为 24h,试验日根据试验单元预报降水超过 0.25mm 时随机确定。碘化银发生器设置在山坡上,在试验日开始之前 0.5~1h 开动,至试验日结束前 0.5~1h 关闭。整个时段取决于当时的风速和离目标区的距离。以 20g/h 的速率播撒。

两阶段中播撒日的实际降水量与可能凝结的云水量基本相当,表明野外播撒试验与云物学期望值之间十分一致。按 Climax I、II 和 II B^① 资料,播撒降水量累计分别超过未播撒降水量 9%,13%,39%。本试验中首次提出按云特征的气象参数进行分层检验,包括 500hPa 温度(表示云顶温度),700hPa 的假相当位温、风向、风速。500hPa 的温度 T_{500} 近似表示云顶温度,当 $-20^{\circ}\text{C} < T_{500} < -11^{\circ}\text{C}$ 时,播撒日降水量超过未播撒日占 75%,说明云顶温度可作为选择作业云的指标,这是播云“温度窗”概念的最早雏形。700hPa 的假相当位温 θ_{e700}° 可综合表示云的热力和水分特征,当 $308\text{K} < \theta_{e700}^{\circ} < 327\text{K}$ 时,播撒日降水量超过非播撒日占 70%,说明比较暖湿条件下在自然云中其凝结水形成率超过冰晶扩散增长耗水率,通过人工播撒冰核,利于降水形成中使云水转化成降水。凝结水形成速率与 700hPa 风速 V_{700} 有关,当 $12\text{m/s} < V_{700} < 14\text{m/s}$ 时,凝结水形成速率最大。西南和西北气流几乎与 Climax 地区错综的山障垂直,因而产生显著的地形抬升,降水增率与统计显著水平均有提高。统计分析表明,播撒引起降水增加

① Climax 全部样本为 623,其中 I (251), II (372), II B(296)属于 I 中剔除上风方有其它单位播撒可能受影响的已播或未播的试验日的一个子样本集。

主要是促使降水提前并延长降水时段,并非由自然降水时段内的降水强度变化引起。

Climax 计划在人工影响天气的历史上占有重要地位,它是少数在统计上具有显著性并在物理上获得解释的播云增雨成功试验之一。而且它标志着广泛进行播撒作业的开始。

1.1.2.3 大湖计划

美国大湖区严冬雪暴,常造成近湖岸工业区和运输干线受灾和损失,遂提出通过过量播撒进行人工影响,促使它主要通过扩散增长形成较轻的雪晶而非霰和雪凇来影响其降落速度,从而使大量降雪离开湖岸而深入内陆,引起地面降水的重新分布。

过量催化的观点最早是 Langmuir 提出来的。Jiusto^[4]根据云中水汽压从水面饱和减为冰面饱和时,云体才能开始完全冰晶化,此时的播撒率即为过量播撒率。播云试验在 1968~1972 年冬季(除 1970 年外)针对无降水的云系、自然降水云系和中等强度风暴进行,采用飞机播撒干冰或机载碘化银发生器或碘化银焰弹。通过雷达检测和飞机测量冰核,确信催化剂施放适当并在整个云体内有效地扩散。有些情况下达到了过量播撒的冰晶浓度要求($10^3/L$)。因野外定量测量降雪率十分困难,虽未获得降水重新分配的测量结果,但多次观测到下风方阵雪的再分布。大湖计划是第一个以降水分布为目的、注重物理评价的非随机化试验。它对浅薄降水系统在冬季降水中的重要性及对其进行人工播云增雨的可能性进行了探索性研究。

1.1.2.4 狂飙计划

狂飙计划是迄今为止唯一的人工影响飓风的试验计划(1961~1983)^[5]。最早对飓风云系进行播撒发生在 1947 年 10 月 13 日,卷云计划机组人员在佛罗里达州一个途经东北大西洋沿岸出海的飓风附近飞行,对飓风云墙外的薄层云播撒了 36kg 干冰,目视发现原先密布的云层变成了散布甚宽的雪云,但不能证实其结构和强度有无变化。

由于每年飓风登陆造成重大经济损失和人员伤亡。1955 年美国增加飓风研究基金,随后建立国家飓风研究计划(NHRP),1964 年改成国家飓风实验研究所(NHRL),1983 年成为大西洋海洋和气象实验研究所(AOML)飓风研究部(HRD)。狂飙计划就属于 NHRP 使命的组成部分,从 20 世纪 50 年代中期就利用飞机系统收集飓风资料。经美国海军和商务部天气局 1961 年 9 月 16~17 日对 Esther 飓风进行 2 次播撒并认为获得成功后(见表 1.1.1)促使狂飙计划作为海军和商务部协作的共同计划。狂飙计划的催化原理归结为:影响飓风眼墙外的对流云体,播撒适量碘化银,促使外围发展与内云墙竞争水分,使外云墙扩大以减小内云墙的最大风力。

表 1.1.1 对飓风眼区附近云层播撒试验概况

飓风名	日期	作业次数	碘化银用量 (kg)/弹数	部 位	估计的最大风速变化 (%)
Esther	1961. 9. 16	1	35. 13/8	云墙内	-10
Esther	1961. 9. 17	1	35. 13/8	云墙外	0
Beulah	1963. 8. 23	1	219. 96/55	眼不完整、未击中云墙	0
Beulah	1963. 8. 24	1	235. 03/67	云墙内	-20
Debbie	1969. 8. 18	5	185. 44/926	云墙内	-31
Debbie	1969. 8. 20	5	185. 82/976	云墙内	-15
Ginger	1971. 9. 26	2	~	雨带云(无明显的眼)	不符合假设
Ginger	1971. 9. 28	4	~	雨带云(无明显的眼)	不符合假设

狂飙计划延续多年,由于有些年飓风太弱或无合适候选飓风或者离大陆太近或进入播撒范围前即已转向,至 20 世纪 70 年代初除对非飓风积云进行一些随机催化试验并获得一定成功以及对进入探测范围的飓风进行大量的观测研究、数值模拟和积云动力学研究外,实际上仅在 8 天内对满足假设条件的 4 个飓风进行了作业,其中有 4 天风力减小 10%~31%,其他影响日无效果,试验结果仍令人鼓舞,而且与假设和数值模拟预期的时机和强度比较一致。

随后美国海军中止其支持活动,同时民航飞机也接近飞行寿命,促使狂飙计划转向试验机较多的美国太平洋沿岸并于 1976 年开始执行新的计划,飞机以及探测技术和仪器作了重大更新和提高,但相应的政策和法律方面的问题却扩大了,把试验移至西海岸并未达成国际协议。1977~1982 年对飓风 Anita, David, Frederic 和 Atten 作了大量的研究以期为新计划奠定物理基础。1983 年的 5 个飓风中无一符合作业标准的个例,故该计划只得中止。

整个试验致命的弱点是通过对未催化的飓风进行多次探测发现,飓风云墙中过冷水太少,冰晶甚多,而且在期望的催化所引起的变化与巨大的自然变异难以分辨。但也不可否认存在着科学之外的因素不能使试验继续进行。

1.1.2.5 云动力催化概念和过冷孤立积云的动力催化

澳大利亚学者 Kraus 和 Squires(1947)在对悉尼附近的层积云进行干冰催化时,首次观测到播云使云体发展,从而提出大量播撒干冰假想可引起低层对流云冰晶化,其释放潜热提供附加浮力使云体上升。这就是后来发展的动力催化概念的最初的依据。狂飙计划在波多黎各以南洋面上空的积云试验真正开始了通过播云影响积云动力学的试验活动^[6]。1965 年仍在原来的地方进行了大量的随机动力催化试验,一次出动 6 架飞机分层飞行,催化前穿云一次,催化后穿云几次,如图 1.1.1 所示。

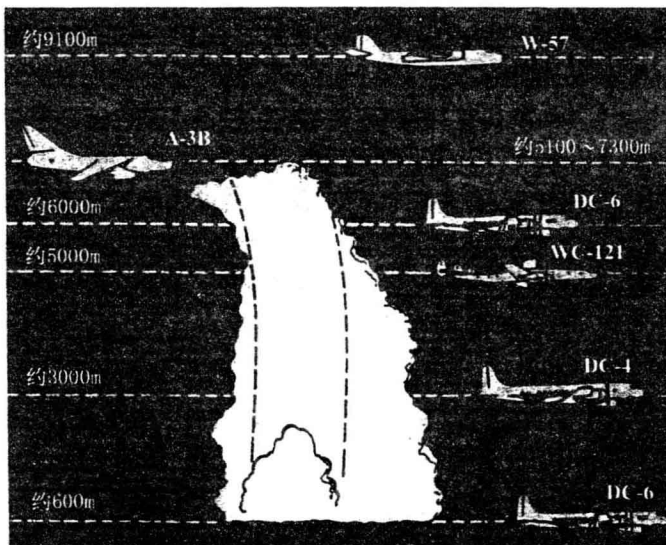


图 1.1.1 单个积云空投焰弹催化和检测方案

外场测量、数值模拟和统计分析综合结果表明催化云的增长平均高于对比云 1.6km(显著性优于 1%),其可催化度(数值模式预报的催化云顶高度与预报的未催化云顶高度之差)与实际催化效果相当一致(见图 1.1.2)。而且发现积云催化后的增长规律随云与其环境的气象条件而异,当对流层中部存在小的稳定的干燥层时,催化后将出现爆发性增长。

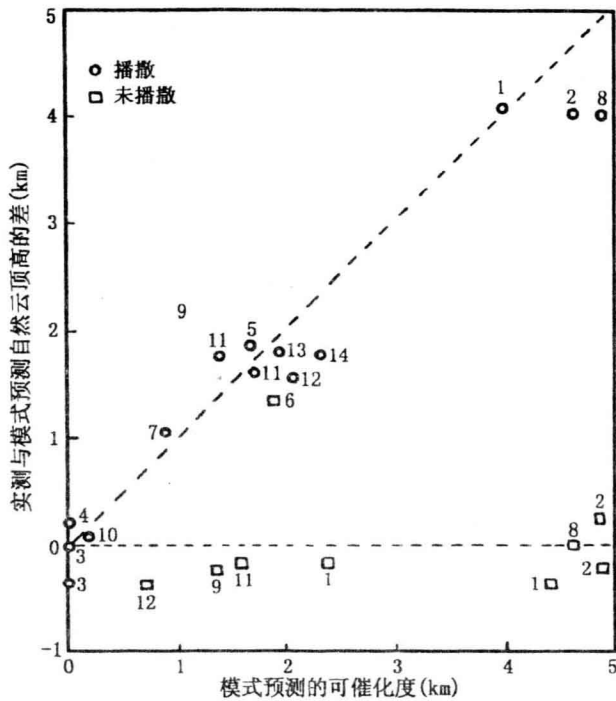


图 1.1.2 1965 年 14 个催化积云单体(圆圈)与 9 个对比云(方框)的可催化性和实际效果

为了确证积云催化后爆发性增长其雨量有明显增加,1968 和 1970 年在佛罗里达州南部开展了积云单体随机动力催化试验,用标定的 10cm 雷达定量测定雨量,再次证实了积云催化后的爆发性增长,而且证实了催化后的降水量大大超过对比云的降水量,其增雨量与可催化性成正比。从而确立了作为与静力催化不同的动力催化概念。这些为其后的佛罗里达地区积云试验(FACE)的设计和实施奠定了基础。

20 世纪 50~70 年代初期正是人工影响天气活动的迅速发展阶段。人们对“天气控制”寄予极大的热情,新的观念层出不穷,理论和实验以及外场试验相互促进,导致了人工播云的黄金时代,催化试验的领域迅速扩大,遍及地形云、积云、系统性降水的人工增雨、人工抑雹、抑制闪电、消雾、人工影响飓风等各分支领域,在数值模拟、人工催化作业方法、工具和探测技术、效果评估等方面取得了巨大进步。

1.1.2.6 苏联高山地球物理研究所等研究单位的人工防雷方法

G. K. Sulakvelidze 等介绍^[2],苏联经过 20 多年的系统试验研究,早在 20 世纪 70 年代就提出了一套人工防雷机制的概念模型,并在高山地球物理研究所、中央气象总台、外高加索水文气象研究所等单位的研究得到验证。当时有关方面的概略统计,在具备技术条件的前提下,苏联防雷作业可减少冰雹灾害 67%~80%。至今他们的防雷机理仍然能够反映当代防雷科学技术的现状。

以高山地球物理研究所为代表的防雷概念指出,云中上升气流随高度增加,最大上升气流出现在云的上部,其后上升气流开始减小,这种分布为过冷却雨滴在云体上部积累形成创造了条件。由于冰雹胚胎的形成是由于过冷却雨滴冻结的结果,由此而得出了人工防雷概念模型,并提出了冰雹形成及冰雹云识别所必需的大气层结条件。

苏联外高加索水文气象研究所(GHRI)^[6]针对格鲁吉亚加盟共和国雹灾较严重的情况,从

1954年起即开展雷暴和雹暴预报,1962~1965年提出对雹云同时播撒碘化银和盐粉的试验,1966~1973年大面积推广,最大防雹面积达25000hm²。

该方法并非基于增加雹胚争食过冷却水分,而是促使积云暖区提前成熟形成降水,加速过冷区云水消耗。采用载盐防雹炮弹射入雹暴暖区近云底雷达反射率增强区的平均高度处,作为吸湿性核,而把碘化银引入最大雷达反射率的过冷却云区,作为冰核。吸湿性核促使凝结增长增强,并通过碰并进一步增大,形成大滴提前成熟下落,使云水不会到达强上升气流区。为防止少量大滴在上升气流作用下进入过冷区,增强潜在雹胚的增长,在雹生长区引入的冰核(-6℃等温线高度以上)可使过冷水冰晶化,以减弱雹块增长。

碘化银引入稍晚于盐粉,其滞后时间决定于碘化银和盐粉播撒高度之间的厚度差,以使在少量盐核上增长后到达碘化银射入区再形成冰晶。

试验中在邻近作业区(对雹灾敏感易受灾的经济作物保护区)划定具有类似地理、气象条件的对比区,进行统计比较(见表1.1.2)。在保护区内受雹灾很小,造成少量灾害的原因有主观因素:忽视作业、作业迟缓或提前结束,因雹暴太强作业力度不足而失效;客观因素:雷达、火炮失效,供电中断、通讯中断和空域不允许作业。由表中可见,成效是明显的尤其是1972年,雹灾既强持续时间又长,但仍然成效明显。催化剂用量1969~1973年5年平均NaCl为1027g/hm²,AgI为146g/hm²。

表 1.1.2 外高加索水文气象研究所抑雹试验结果(1966~1973)

年份	保护区面积 (hm ²)	工作日	作业次数	NaCl (kg)	AgI (kg)	保护区受灾面积(hm ²)		对比区受灾面积 (hm ²)
						由于组织技术原因	由于空域不允许	
1966	5000	2	7	26	10	0	0	—
1967	8000	23	80	422	210	178	0	2000
1968	11000	29	73	950	475	351	0	3700
1969	15000	24	95	1400	700	91	198	5020
1970	17000	36	95	1372	628	17	61	6211
1971	20000	36	124	1605	789	0	0	4177
1972	25000	57	192	2984	1474	91	0	7979
1973	25000	32	108	1556	675	200	0	3715

1.1.3 综观美国人工影响天气发展历程和启示

人工影响天气发展的早期,科学试验和理论研究非常活跃,相互促进,形成了20世纪50~70年代初期人工影响天气学科和催化作业蓬勃发展,欣欣向荣的繁荣景象。客观实际需要,常常不等科学家把一切都研究清楚了,就把一些新的观念和不完全成熟的技术方法付诸实施。人工影响天气的实践也是这样。这对促进作为人工影响天气原理基础的云降水物理学的迅速发展无疑是很重要的动力,但也有负面影响。美国从20世纪70年代初在人工影响天气的研究方法上就产生了分歧,形成了两种学派。80年代这种趋势进一步发展,而且有明显的科技政策背景的影响。最近30多年来人工影响天气学科和业务技术进展不快,未取得重大突破,与研究方法分歧和科技政策不当不无关系。

1.1.3.1 两种不同的研究方法

一种学派以理论和实验方法著称,提出理论假设,对假设进行试验,包括采用数值模式,以便深入地了解其中的物理过程,最终目的是改善催化假设(何时、何处、如何进行播云)。具体实例可举受美国国家科学基金会支持由Hobbs主持的Cascade计划^[7]。

Cascade 计划(1969~1974)是华盛顿州立大学云物理研究组在华盛顿州离太平洋东海岸 225km 处,近南北走向的 Cascade 山(喀斯喀特山脉)研究冬季云和降水的结构、形成降雪的物理过程以及人工播撒催化剂对云和降水的影响。采用机载云物理仪器和垂直指向多普勒雷达,配以项目齐全的地面、高空探测系统,收集云、降水的动力学和微物理资料,对天气系统不同部位,人工催化前后的核、云和降水质粒的类型、浓度、凇附、聚合以及雪花含银量等进行了仔细分析。用数值模式估计云顶催化质粒的轨迹,预报催化效果出现的时间和范围,并与探测资料比较分析。云体冰晶化的中间效应还可由云中出现的华、虹、彩光转化为晕、假日、日下晕等光学现象证实。通过对 56 个个例的探测分析,记录下从云至地面降雪各事件的物理过程链,总结了云系结构和形成降雪的物理过程并对人工影响效应进行物理变化评价。

为了使得在云内和地面降雪中易于检测播云效应,飞机在云中的播撒率较高,干冰为 250~1000g/km,碘化银焰弹平均为 3~20g/min,播撒期 1~2h。测量表明当自然冰晶浓度小于 100/L 时,催化后冰晶浓度增加明显,最高倍数达 2 个量级;而自然冰晶浓度大于 1000/L 时,催化引起的冰晶浓度变化相对小。云内取样发现未催化的云,主要是浓度较小的大的凇附冰质粒和水滴,经过大剂量催化后转化为高浓度的小的规则的未凇附冰晶。地面降雪强度和雪粒形态变化与播云假设一致,在预报的催化效应时段内,降雪率增加,而且伴有雪粒形态的凇附率和聚合率的减少,雪中含银量出现比正常背景值多出 100 倍的情况,雪中冻结核浓度也明显增加。

Cascade 计划中对地形云的高播撒率效应一般表现明显,并可直接检测,在目标区的降雪也获得了多种影响效应的物理证据。通过有限的个例观测研究,虽不能得出普遍的结果,也难以估计整个实施播云计划所增加降雪的定量效益,但是此类详细的物理评价,基于对自然云和降水的综合探测和理论分析计算,试验结果支持预定的目标,即人工影响可以改变通过山障的降雪分布并增加降雪量。物理评价方法虽不能代替统计评价,但在研究不同类型的云和降水相应的具体播云技术方面具有重要的启示。有了这方面的基础,对其后开展播云的试验进行科学的设计和统计评价,思想上就会敏锐得多,至少可以避免走弯路。

另一种学派为观测实验方法,它强调通过改进对催化云及其周围环境的观测和实验,深入了解播云产生的物理过程,但缺乏新颖的概念模式和试验假设。具体实例可举科罗拉多河流域播云试验计划(CRBPP)^[8]。

科罗拉多河流域播云试验计划作为研究性试验与作业性计划之间的一个关键步骤,由农垦局主持,其主要任务是提供大范围地区作业性计划所增加的降水的技术评价,由科罗拉多州立大学 Grant 设计,采用 Climax 试验所制定的选择催化日标准和使用的播云作业技术,进行随机试验,在 San Juan 山区实施,历时 5 个冬季(1970/1971 年至 1974/1975 年)。

在前 4 年统计分析显示对任何测站的降水的影响无显著差异的情况下,农垦局为了取得对自然云和催化云系统的物理特征深入了解以作为该试验统计结果的一种补充,与怀俄明大学签订合同,由该校于 1974/1975 年冬季实施详细研究 San Juan 山区上空内风暴的动力学和微物理过程以及人工催化潜力的计划。1974/1975 年冬季动用两架飞机,装备观测冰晶形状、尺度和浓度的粒子测量系统二维成像探头(PMS-2D),光学冰晶计数器,冰晶取样器,轴向散射云滴谱仪探头(ASSP),热线含水量仪,滤膜冰核取样器等云物理仪器,其它飞机测量仪器包括温度、露点、气压、航向、飞机定位、湍流能以及多普勒雷达和偏航风标用以测量水平风和垂直气流。地面布置 68 个雨量器网,2 个冰核计数站,随机个例研究时段每 3h 一次探空,10~12 个高空测风站配合观测。分别对 12 次风暴进行了研究,详细分析了其中 8 个个例。

通过综合分析认为 San Juan 山区大多数风暴其动力学过程和微物理结构具有与热力稳

定度有关的 4 个发展阶段(如图 1.1.3 所示):早期的稳定阶段,气流的主体低于山顶,受阻而折向偏西方向,故越过山障仅产生小的垂直位移。云中液水含量低,冰晶浓度高,催化增雪的潜力很小,而且地面投放 AgI 很难到达云层高度;稍后为中性稳定度阶段,风暴加深,其典型尺度几乎可达整个对流层,在目标区上风范围出现明显的过冷云水,虽然含量仍小于其后的不稳定阶段,但轨迹分析表明此时播云可在目标区产生降水;随后为不稳定阶段,在山前地面形成辐合区,上空发展对流区出现对流云线,其中含水量最高,对流元中所含冰晶浓度低至 1/L,比其周围还低,故山前对流区为播云的最佳对象,而且地面辐合发展对流利于地面投放的催化剂被输送进入风暴影响目标区降水,关键在于作业计划中必须及时准确地分辨风暴的不稳定阶段,这可从上风方的探空中不难检测对流性不稳定层结,同时山前地面发展一水平辐合区可作为风暴进入不稳定阶段的标志;在山顶高度出现沉降,进入最后的消散阶段。

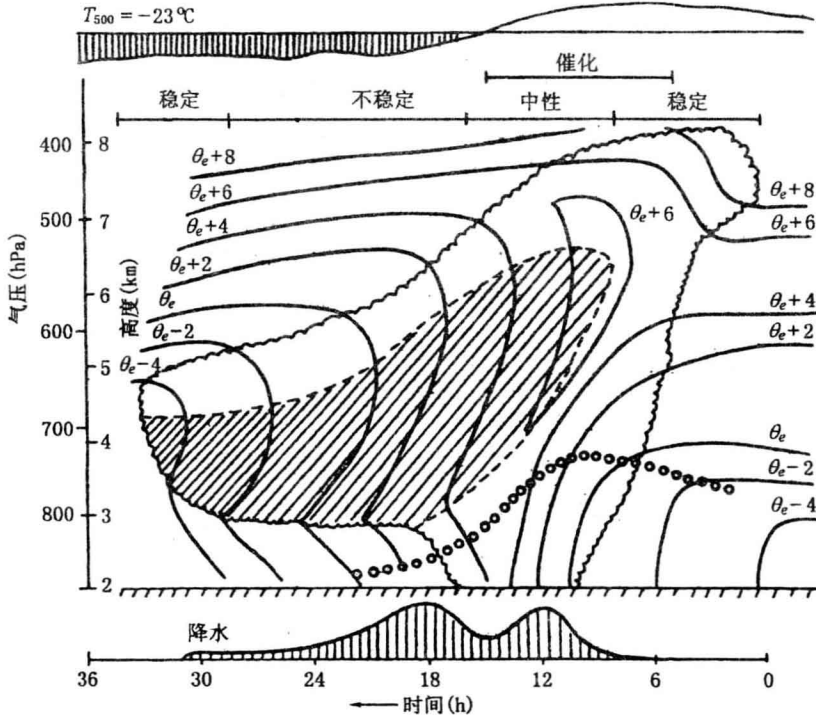


图 1.1.3 San Juan 山区上空典型风暴的高度—时间剖面图

实践为等相当位温(θ_e)线,阴影表示对流性不稳定区,上端标出 500hPa 的典型温度连续变化,基线为 -23°C ,小圆圈连线表示其下风向 $<160^\circ$ 的受阻挡气流,下端为降水变化,风暴 4 阶段和原定播云时段也已标出

风暴发展时上层冷空气平流引起 500hPa 温度降低,而干空气平流和高空下沉使云顶降低,故云顶在风暴的后期比其早期要暖。由于云顶温度和 500hPa 温度变化的逆转关系,使得对一较暖的 500hPa 温度判据要求,把风暴后期的不稳定阶段从统计试验中排除,而这恰恰是最适于催化的阶段,相反却把早期的稳定和中性阶段归入可催化的指标范围内,此两阶段催化潜力甚低,结果使播云效果趋于消失。CRBPP 的统计评价把播云无效归结为在作业中不能准确预报风暴特征,这里主要指云顶温度,而且通过事后分层统计认为一般支持 CRBPP 的设计判据,并发现在较暖的云顶($-9\sim-29^\circ\text{C}$)播云增雪的证据,而强烈不稳定条件播云并未增雪。此结论与由风暴动力学过程和微物理结构得出的风暴不稳定阶段具有最大播云潜力相矛盾,起因在于所采用的稳定度判据不同:前者采用基于地表气块上抬的潜在性不稳定来划分风暴周期,实际上是一种条件性不稳定,而且不考虑相应的气流场特征;后者采用对流性不稳定判

据,同时考虑了地形和气流促使不稳定能量获得释放。

上述论述表明,在 CRBPP 中所采用的播云判据和催化剂施放方法,不适合于大多数风暴的动力学结构和微物理特征。CRBPP 由具有明确的工程意向机构的农垦局主持,从发展生产增加供水的现实政策出发,当然侧重于工程应用而并非检验科学假设。早在 20 世纪 60 年代受国会委托,提出“天空水计划”(西部增水方案),其主题就是大气水资源管理,指导思想就是已掌握充分的科学知识,开始进入应用阶段,即探索如何应用现有的技术和方法达到大气水资源调制和管理的目的。农垦局承担的几乎所有的试验计划,都是通过与大学、私人公司和其它政府机构以签订合同的方式来实施的。

20 世纪 80 年代这两个学派之间的分歧进一步发展。理论/实验学派认识到对自然云中的降水过程的了解尚不完全,加入播云催化剂将使之更加复杂化,故他们致力于更多地了解自然云中的基本物理过程而较少包含引入催化后的影响。虽然这样促使了理论/实验方法在云、降水领域的研究更加深入,但在播云催化方面因投入太少而显示不出其威力。

观测/实验学派虽然也致力于数值模式和对催化引起的基本物理过程的研究,而且较大型的云模式就是由于对催化的兴趣和支持所推动的,但理论色彩较少,或多或少地把播云作为一种实验科学,对未证实的科学假设并非情有钟,因为他们总认为已确立了作业假设,实际上剩下的仅仅是单纯的外场作业。这样造成了人工影响天气领域缺乏新的概念模式和探索性的试验假设,业务技术也停滞不前。

若理论/实验学派在播云领域中仍能保持积极态度和强烈的兴趣,则新的播云假设将会不断产生,外场试验也将深入持续地发展。而且观测/实验学派也能共同参与并不断吸取营养,获得共同发展。人工影响天气的实质性进展只有在健康的理论和实验/观测之间互相促进共同提高的正常关系恢复之后,同时也应加强国家科学基金对人工影响天气科学试验/播云假设的支持力度。

在播云催化作为成熟的作业技术之前,仍有不少基本理论和工程技术问题需要回答和解决。人工影响天气发展的关键在于未来如何更多地在实践中检验和完善这些假设。只有对这些带根本性的问题较好地回答和解决之后,才能说人工影响天气是一个成熟的有生命力的技术方法。人类目前正面临着水资源缺乏的困惑,人工影响天气具有巨大的社会效益,我们既不能忽视,也不能分散力量零敲碎打地搞,需要具有国家或地区性决策意义下的重大攻关计划和实际措施。

1.1.3.2 政策的起落^[9]

二次世界大战后,为了发展农业生产和交通运输并从增加供水和保护人民生命财产不受损失出发,美国联邦政府把努力了解如何人工影响天气和开发天气资源潜力作为自身的职责。早期主要由军事部门为改善雾和低的层状云引起的能见度恶化而开展的研究。干冰和碘化银的催化作用被发现后,人工影响天气活动迅速发展,但随之在科学界内部产生争论。美国气象学会于 1951 年 5 月 3 日发表了关于人工影响天气的声明,这是该学会第一个有关人工影响天气的声明,基调是播云效果不大,影响范围也不大,强调要开展云物理研究。此事引起美国国会的关注,于 1953 年通过议案,成立天气控制咨询委员会(ACWC1954~1956),其成员包括农业部、商业部(天气局上级主管部)、国防部、内务部(农垦局上级主管部)和卫生教育福利部的部长或其指定代表,还包括私营公司代表,主席由总统任命,委员会的任务是对广泛开展的天气控制试验进行完整的研究和评价,以确定政府应开展、参与或管理以人工控制天气为目标的各种活动的深入程度。该委员会于 1956 年底向国会提出的报告,促使国会于 1957 年通过关于人工影响天气的法案,责成国家科学基金会(NSF)负责制定并支持和协调人工影响天气的试验

和评价的规划,赋予其在联邦政府内对人工影响天气的指导责任。此法案1958年生效,从此开始了美国人工影响天气活动的新时期,从理论到实验以及外场试验的各个环节都获得经费支持和协调一致。在其后的10年中,在国家科学基金会主持下,科学基金会管理仍按传统方式稍作些变通,主要仍是促进基础研究。这样使人工影响天气的研究和试验的规划得以健康发展,理论、实验和外场试验密切结合互相促进。

在这期间联邦政府其他一些部门也都开展了人工影响天气的试验研究工作,但都主要偏重于技术应用。后来国会认为这些联邦机构对人工影响天气活动已获得较好的开端,无需国家科学基金会再行使指导职责,遂于1968年通过新的法令,对科学研究项目以外鼓励各联邦机构提出的试验任务,并要求相互协调。

实际上这是一项失当的决策。因为当时人工影响天气领域仍处于基础研究阶段,许多理论问题尚未解决。在这种方针指导下,各联邦机构自行其是,促使研究和发展转向外场应用技术试验,尤其是农垦局主持的计划,削弱了对云物理学和动力学的基础研究。

1968年国家基金会中止全美人工影响天气计划汇集的年报工作,并于1971年把人工影响天气的研究项目转向应用研究和技术发展的国家急需性研究理事会(RANN),同时把基金主要支持无意识人工影响天气——都市气象试验(METROMEX,圣·路易斯市,1971~1976),还承担抑雹研究的领导职责,致力于由国家大气研究中心(NCAR)设计和指导的国家冰雹研究试验(NHRE,在科罗拉多州北部,1972~1974)。1978年国家科学基金会所属的RANN对人工影响天气的兴趣逐渐淡薄,支持的经费迅速削减(见表1.1.3),而且又将重点回复到基础性研究。

表 1.1.3 联邦政府各机构对人工影响天气研究*的经费支持(1963~1985)(百万美元)

财政年度	国家科学基金	内务部	商业部	国防部	农业部	其它	合计
1963	1.3	0.1	0.2	1.0	0.1	0	2.7
1964	1.6	0.2	0.2	1.4	0.1	0.1	3.6
1965	2.0	1.3	0.1	1.5	0.1	0	5.0
1966	2.0	2.9	0.7	1.3	0.1	0.1	7.7
1967	3.3	3.7	1.2	1.3	0.3	0.1	9.9
1968	3.4	4.6	1.5	1.4	0.2	0.2	11.3
1969	2.7	4.3	1.1	1.6	0.3	0.2	10.2
1970	3.2	4.8	1.3	1.9	0.3	0.2	11.7
1971	3.8	6.5	3.0	1.4	0.4	0.7	15.8
1972	5.5	6.7	3.9	1.8	0.4	0.4	18.7
1973	6.2	6.4	3.8	1.2	0.4	0.4	18.4
1974	4.7	3.9	3.3	1.2	0.3	0.1	13.5
1975	4.7	4.0	2.5	1.1	0.1	0	12.4
1976	5.6	4.9	4.6	1.1	0.1	0	16.3
1977	4.4	6.8	4.6	2.8	0.1	0	18.7
1978	2.0	7.6	4.6	0.1	0	0	14.3
1979	2.0	9.6	5.3	0	0	0	16.9
1980	1.5	9.4	5.8	0	0	0.1	16.8
1981	1.5	8.5	5.4	0	0	0	15.4
1982	1.2	5.7	5.4	0	0	0	12.3**
1983	1.2	4.5	3.4	0	0	0	9.1
1984	1.2	5.4	1.5	0	0	0	8.1
1985	1.3	5.6	2.1	0	0	0	10.0
合计	66.3	117.4	65.5	22.1	3.3	3.6	278.2

* 指包括无意识人工影响天气,在大气中施放气体、烟尘、水滴、气溶胶和染料,用以改变地面和云的辐射传输和水陆表面能量交换特征的广义人工影响天气。

** 原数字有误,已改

在美国,20世纪70年代以来人工影响天气领域进展缓慢,未取得重大突破,与20世纪60年代后期联邦政府不适当地改变由国家科学基金会行使管理和指导的政策密切相关,导致了从注重试验研究很快转向以发展和应用为主,大量实施外场作业计划,有些计划缺乏严密的物理基础,主持人遴选不当或频繁更替,不注重物理和统计评价,从而出现无明确结论的结果,挫伤了资助机构和公众对人工影响天气热情支持的积极性。加上美国大部分地区原先的干旱基本解除,气候趋势有些转变,促使80年代联邦经费锐减,从20世纪70年代平均每年1600万美元减至1984年的800万美元,作业计划也从1979年的79个减至1985年的37个。在这种情况下人工影响天气最终未被列入20世纪80年代3个重点学科。

人工影响天气研究基金已从20世纪70年代中期峰值的每年19000万美元,减至90年代的每年500万美元。20世纪80年代末期兴起的“全球气候计划”可能部分地转移了人们对人工影响天气的重视和研究基金。1997年商业部、州/联邦计划的零平衡,人工影响天气研究计划经费仅每年50万美元。

相应的以色列政府也决定,中止已持续36年的人工增雨研究计划。由此说明人工影响天气研究试验工作,在一些主要国家(包括俄罗斯)已连续多年滑坡。当然世界范围的人工影响天气活动并未停止,美国每年仍有约40个作业计划,人工影响天气作业在全世界仍有22个国家和地区还在正常开展。我国人工影响天气作业和试验无论在深度和广度上仍有很大发展,并特别注意提高人工影响天气作业和试验研究的科学水平和社会经济效益。

1.1.3.3 从黑箱到物理过程链

早期的随机播云试验,均属于所谓“黑箱试验”,只规定输入(核)要确定输出(地面降水),系统中的过程演化一概不知。实际上催化播云有多种原理和方法,而播云的结果也可出现正、负、零效应,同时在程度上变化更大。单纯的统计试验,总结不出符合物理学原理的概念模式,即使像各种“播云窗”这类指标,也是试验的探测参数,并非直接催化效应的物理测定。

早在1966年美国科学院全国科学研究委员会(NAS-NRC)在评述报告中就提出^[30],整个降水过程可分为多个次过程链,可对每一次过程之间的联系进行考察以说明催化的效应。该报告的主旨在于倡导加强物理与统计之间的联系,以改善对过程的了解和提高效果评价功效。但国家科学基金会并未着力实施。

以色列冬季过冷大陆积云人工降水试验I(1961~1967),在黑箱试验的同时,也对云系的物理特征进行平行的观测分析,但它并不属于针对基本概念进行统计试验的完整的组成部分,当然它有助于从物理上解释统计结果,使统计评价具有较好的物理基础。

20世纪60年代末,美国一些大气科学家开始注重物理评价,突破原先的黑箱试验,例如由Hobbs主持的Cascade山冬季云和降水性质及其人工影响的出色工作。通过大量个例探测,直接检测从云至地面降水的演变过程参量,但仍缺乏统计量,难于定量计算增加降水效益。

后期随着仪器设备和探测技术的迅速发展,有可能直接测定播云假设的物理过程演变链的响应变量,把物理机制纳入完整的统计设计之中,并作为其主要部分,实现从“黑箱”到“灰箱”进入“白箱”的转化。

美国高原试验(HIPLEX-1,1979~1980)代表了首先试图从对假设的黑箱试验转向多重响应变量的统计试验,它是一种较为复杂的物理与统计紧密结合的物理效应统计检验^[10]。它预先定义响应变量,通过随机试验进行探测验证,使我们可以更多地了解播云催化的整体物理效应,即使演变链之间有些响应变量联系较弱,也不会使整个试验失败,我们可以评价在那一环节有失误,作些调整,仍可取得设计所要求的响应结果。因此这种形式的试验计划对播云概

念模式的评价是十分有效的,而且可以充分运用数值模拟方法进行数值试验,使我们在大型野外试验之前处于主动和有利的条件之下。

类似于HIPLEX-I的直接测量物理过程演变链响应变量的试验,还有在南非进行的大陆积云催化试验(1984~1985)^[11]和1987年在北达科他州西部催化作业计划中对浓积云播云催化剂示踪和降水发展过程的详细观测和数值模拟研究^[12]。

近年来在探测技术和仪器装备方面有较大进展,播云技术和试验作业的设计和评价也在不断进步和深化。不少国家制定了宏伟的人工影响天气研究和发展的规划。相信在正确的政策指导下,加强国际交流和国内协调合作,促进理论和实验/探测之间的相互促进和健康发展,人工影响天气工作必定会走上迅速发展的大道,充分发挥其潜在的社会经济效益,其中WMO和类似于美国部际大气科学委员会(ICAS)这样的中介咨询机构,仍可起到积极的不可替代的作用。

1.1.4 人工影响天气在我国的兴起和发展

关于人工影响天气在我国的兴起和发展情况,详见第九章中国人工影响天气概述中9.1节。

1.1.5 关于人工影响天气科学技术现状和发展的论述

1.1.5.1 中国气象学会的首次评述(声明)

1993年9月,中国气象学会对人工影响天气科学技术现状和发展提出看法和建议,有关内容详见第十四章14.6节。

1.1.5.2 WMO对人工影响天气现状的评述

2001年6月WMO执委会通过关于人工影响天气现状的声明(附录),基调是审慎乐观的,态度是积极的。基本内容可以归纳为:

①人工影响天气主要利用云的微物理不稳定条件,通过人为扰动,影响自然演变过程。其科学基础已获得实验、外场试验和数值模拟的论证。

②新的仪器设备和技术方法的综合应用并与数值模拟紧密结合,为人工影响天气的深入发展开辟了新天地。

③强调了效果评价,认为随机化方法最可靠,并指出探索物理预报因子的重要性,以及必须加强对各种降水参量进行直接测量,并进行物理评价。

④简要概述了符合物理原理并经外场检验的各种人工影响天气活动,包括过冷云增雨和降水重新分布,地形云、层状云、积状云催化增雨,消雾,抑制冰雹,节制热带气旋,遏制闪电等方面。

1.1.5.3 美国气象学会的看法

1998年10月美国气象学会发表了关于有意识和无意识人工影响天气的新的声明。表现出对人工增雨效果评价更加谨慎,强调对播云活动应进行具有显著变化的统计分析,并应获得相应的物理检验,以证实统计结果确实起因于播云活动,并阐述播云方法的功效,进而讨论在各种情况下和在其它地理区域也能导致预计的积极效应。同时对人类活动的无意识人为影响天气气候更为关注。下面重点作概要介绍:

引言中强调了播云催化剂新配方,改善了成核率和核化速率以适应催化目标云的变化特征;提出计算机硬件、软件和对云物理了解的进步,使得二维、三维云数值模式可以模拟云过程和嵌入其中的大尺度气流场,并进一步区分实际云中的主要物理过程。

人工影响天气一节中,明确驱散暖雾可通过高昂的热力方法,在少数主要的国际机场有效地实施,但经济有效的消暖雾方法尚未确立。由于消雾作业效果易于观测,且可重复进行,故无需对其有效性进行统计分析。

近年来通过模式模拟和外场试验,开始重新关注使用吸湿剂催化暖性和冷性对流云,即通过加强暖雨过程(凝结/碰并~碰并/破碎机制)来增加降水。研究了两种增强暖雨过程的方法:播撒小的质粒(直径为 $0.5\sim 1.0\ \mu\text{m}$ 的人工云凝结核),通过凝结核化云底初始云滴谱加速碰并产生降水;和播撒巨型吸湿性核(直径为 $30\ \mu\text{m}$ 人工降水胚胎),通过生成大云滴促进自动转化和碰并过程来加速降水发展。为了这一目的特别发展了吸湿性焰弹,使播撒人工云凝结核成为可能。

用吸湿性焰弹产生很小的强吸湿性质粒,在大陆地区上升气流中的混合相对流云中施放,发现对近云底云滴谱已产生了显著的有效的调制作用,增强了在云生命早期形成大水滴。试验报告认为已获雷达估计降雨增加的统计性证据,这些结果受到数值模拟的支持。但有关吸湿性播云对冰相过程的作用及其动力效应等基本问题仍未解决。直接测量吸湿性播云的物理事件链的关键步骤,并要求证实播云概念模式和这些方法在增加暖性和冷性对流云的降水范围的有效性尚未获证。

对人工抑雹试验和作业开始持比较积极的态度:肯定了由于冰雹造成巨大经济损失,促进在世界范围持续开展减少雹暴财产损失的作业计划,提出要求对风暴的初始形成和包括冰雹的降水演变进行新一轮的试验。

无意识人为天气影响一节中,强调指出植物燃烧在广大地区常用作土地清理和土壤更新措施。但它极易引起森林火灾、土地争夺、甚至爆发出地冲突。而且大范围的植物燃烧所产生的气溶胶质粒恶化空气质量和能见度。烟尘改变云的微结构,增加云的反射率,阻滞云滴碰并增长从而减少降水。若遇到干旱更加剧致灾效应。当大量丧失地表植物,使局地水文循环和气象过程得以改变,可出现次级调制作用。这类变化的物理性质,类似于过度放牧,若发生在潮湿的热带森林区,将导致更为严重的后果。

人为无意识天气影响可造成生态灾难。如改变地表状态和区域效应,均可导致增强热应力。由于温、湿度变化可导致疾病增加,大气污染本身即代表呼吸健康的灾难。同时人类产生的污染物使平流层臭氧衰减,引起对流层中太阳紫外辐射的增加,产生新的健康危机。空气质量变化和气象条件变化所造成的健康压力,使人类和生物界已受到饥饿、干旱、水患、战争或社会动乱的威胁,更加雪上加霜。

在最后的建议一节中补充两点:强调不能把通过播云增加降水视作是缓解干旱的主要手段。增加降水的机会通常很小,尤其在干旱的气候条件下。比较有效的增加降水计划应是预防干旱,即立足于全年的水资源管理决策,诸如雨季人工增雨作业、土壤保墒,增加水份储存。进一步指出,人为影响天气和气候条件遍及各方面,必须深入了解有关经济发展的每项活动,都可能改变环境过程和大气条件,必须对无意识人工影响天气持续进行研究和控制,研究的范围应延伸至包括自然反馈和社会各种反应,以此制定政策来减少产生严重影响的机会。

1.1.5.4 云降水物理和人工影响天气的国际学术交流

从第一届国际云物理会议(1954)至今已47年,云物理学的学科领域有了很大的扩展,历次会议的概况如图1.1.4所示。从历次会议交流的内容来看,表现出研究方向有重大调整的趋势。以1968年(第5届)和相隔20年后的1988年(第10届)为例进行比较,如表1.1.4所示。