

文章编号:1006-7639(2004)-03-0083-07

人工影响天气——未来的景象

Roland List

(多伦多大学物理系,多伦多,安大略省,加拿大)

摘要:通过对降水过程认识的提高及发展更加完善的方法和技术,人工影响天气的效果将得到实质的改进。

中图分类号:P48

文献标识码:A

1 人工影响天气的发展及成果

现代人工影响天气始于1948年Langmuir和Schaefer(Schaefer 1953)的研究工作,他们用粉碎的干冰在云中过冷水层中播撒,产生降雪并形成云中空洞(图1)。这一试验令人信服地见到播云的实际



图1 每英里撒固体干冰1.7磅,播撒24 min后的轨道航拍图(Schaefer1953)

效果。由此在世界各地产生出一系列增雨和防雹的试验计划。人类对人工影响天气的无限期望从美国总统约翰·肯尼迪1961年对联合国的一次演讲(Kennedy 2003)中可见一斑,他当时在谈到有关宇宙开发及和平利用太空时指出:“我们应推进各国在天气预报和最终控制天气方面的进一步合作。”他预测将来人类能够控制天气。也就是说在02时按一下电钮,17时就能得到降水。

人影能做什么不能做什么在世界气象组织(WMO)定期修订版《人工影响天气的艺术》中已有所总结(WMO 2001 b)。美国气象学会(AMS 1998 a b)也出版了类似的评估报告。WMO还发布了人工影响天气的设计指南(WMO 2001 a)。在这些文献中列举了人影成功的个例:消除暖雾、过冷雾及过冷层状云盖,有限范围内的冷暖云增雨。也列举了人工增雪、防雹和龙卷的防灾及人工影响洪水和热带气旋(飓风和台风)等不成功的随机试验。播撒AgI消弱飓风风力的人影试验在WMO的文献中也曾提到(WMO1976),但在美国的要求下这一成功个例的说法后来被取消了。总之,对有重要经济意义的降水天气和严重风暴,人工影响的可能性是相当有限的。

美国国家研究委员会最近发布了有关人影的一个很有用的报告(BASC)。Silverman(2001 a)近来发表的有关成冰核播撒的权威评述文章,Dennis(2001)和Hobbs(2001)的评论以及Silverman(2001 b c)的应答文章均指出了一些关键问题。

首先,我对人影工作持支持态度。作为一个实验物理学家,我喜欢主动的云降水机制试验并看到人为影响的效果。这样的工作比本质上被动的观测更有实际效果。另外,我的有些观点(如通过作业增加降水10%~20%)仍需事实验证,这需要将混合在噪声中的有用信号提取出来,并提高大气科学非常规探测方面的测量精度。

2 世界气象组织的增雨试验标准

收稿日期:2004-04-07; 改回日期:2004-08-24

作者简介:Roland List(1929-)国际著名气象学家,云物理、人工影响领域权威。他曾任世界气象组织(WMO)副秘书长,现为加拿大多伦多大学物理系教授。E-mail:List@atmosph.physics.utoronto.ca

译者简介:周跃武(1961-),男,甘肃张掖人,助研,主要从事人工影响天气及灾害性天气的野外观测与研究。

为防止不合理的所谓成功试验,20世纪60年代后期世界气象组织制定了人影试验标准,其要点是试验必须是随机的。因此强调已有的气候资料须能够支持试验的可行性检验和完成周期。具体增雨项目的4条标准为:1) 试验必须是随机的和可用统计学方法评价的;2) 成功试验必须用地面观测的降水量检验;3) 试验在统计意义上的成功必须得到物理概念的支持;4) 成功试验必须能在世界其它地方重复(可移植性)。

这些标准(List 2001)很容易从降水推广到防雹。

随机试验(WMO第1标准)

用飞机对过冷层状云或暖雾和过冷雾播撒(或地面发生器对雾播撒)的效果已被观测证实不再需要进行效果的统计检验。对层状云而言,因为飞机飞行的路线在层云的消散部分有所反映,播撒区与周围未催化部分很容易分辨,未播撒的层云部分不能产生降雪。然而,有趣的是图1的椭圆播撒路径并不能使美国天气局信服,所以Langmuir和Schaefer又按“Ω”型路线进行了一次播撒,并表明他们能在云中画出通用电气公司(GE)的商标图案(T. Henderson 2003,个人交流)。

另一方面,对对流云催化效果的评估是困难的,因为不知道播撒云如果未播撒会是什么情况。降水是由人工催化产生还是其他什么方式产生?或者象一般人们期待和认为的那样,对正在进行的降水过程降水能催化增强到什么程度?冰雹的形成可以抑制吗?这些问题必须要求播撒云与未播撒的相似云以一个试验日为试验单元进行随机比较(周期为5~10a的交叉试验设计)。P. Pioggia指出,即使降水相关因子高达0.8的邻近目标区和控制区也不能保证气象上的充分相似性(List等人1999)。严格的设计标准和寻找高相关的目标区、控制区是人影随机试验的困难所在。

以单个云体为试验单元的播撒在3~4a内(Mather等人1997)可得到评估结果。这一方法假设相邻的云体间距离足够远,为了比较的需要,不会被播撒相互影响。然而对整个单一云体的某个要素的催化可能通过催化物的湍流输送(用于冰和液氮播撒(Fututa等人2000)可能不会有这种输送)影响其周围云体,另外,动力相互作用也可能存在。

基本的统计学Gabriel(1999)的论文介绍了统计学应用于人影的复杂性,他将拒绝零假设的置信

度和幂因子作为评价人影效果的关键指标。这种方法也是以往大多数试验所采用的评价方法。最近,Gabriel(2002)提出了一个新的改进方法用于评价随机人影试验,他将可置信区间作为是否成功的关键指标。在文中他还列举了在以色列1(Gabriel 1967)和以色列2(Gabriel和Rosenfeld 1990)2个试验中使用该方法都得到了相当满意的结果。

Gabriel教授同时强调共享不同试验得到的大量资料数据可改善综合的结果(Gabriel 2002),这种资料的共享可能促进试验项目的国际合作,在这些国家可平行进行设计并实施计划。这将减少有关国家的费用并分享各自的成果。

“坏样”在防雹试验中一个强冰雹云介入播撒样本(“坏样”或外来物)可能完全改变统计结果,这种不利影响可采用“剔除法”解决。

统计学采用“剔除法”和类似“自举电路法”来处理有关这些最严重灾害(冰雹)、某个最成功的(降水)试验单元或播撒事件对最终结果的影响,从而导致物理学和统计学的结合,这将产生非常有价值的进展和未曾预料的物理解释。

该评价方法能用于任一播撒试验的资料积累阶段或之后的分析研究中。用这些方法检验以往的试验也能看出是否某些云对播撒的反应特别好。

地面雨量(WMO第2标准)

所谓增雨的效果必须基于地面观测(增加的)的雨量(对防雹而言应是雹灾的减轻)。只有地面的观测值才具有经济价值,因为平均而言从云中降下的50%降水在到达地面前蒸发而且大多数的降雹(直径<1cm)落地前融化成为雨滴。虽然雨量筒可用于测量区域(面)降水量,但对对流云降水的测量只能是单点上的,因而其面降水量资料是有限的。另一测雨工具是雷达,它提供基于所探测范围内所有降水粒子直径6次方总和的雷达回波资料,雷达观测的并非降水而是雨的立方的平方。要得到雨量须假设雨滴尺度的谱分布,通常采用Mashall-Palmer分布(Marshall和Palmer 1948)。一块云中M-P分布的变化是很大的。进一步看,雷达测量的是地面上方不同高度(它随离开雷达的距离而增加)的降水,因此忽略了蒸发作用的影响。对于对流云而言,可行的解决方案是采取一个集雷达和其它遥感资料(卫星资料等)、云中飞机观测、下投式探空仪、加密地面观测遥测系统、雨量筒及中尺度气象水文网诸资料的同化模式,来描述云和云系中粒子谱的演变。

物理解解(WMO第3标准)

所有剧烈天气事件的人工影响均涉及含有动力学和云物理学中不同方式相互作用的天气系统,这些相互作用受热力学定律制约。依据系统配置和动力分析可以模拟出产生雨、雪的云、强风暴、冰雹云和龙卷、季风或飓风等。云物理定律分别描述雨滴和冰粒在凝结核和冰核上形成的凝结过程和冰核活化过程;时常存在的液态、固态粒子分级的平行演变过程;粒子空气动力学和粒子热量、质量的传输过程;粒子相互作用的属性和粒子的总体特性;它们与发展中的云或云系之动力学和热力学的相互作用;某一中尺度环境和天气背景下云的模拟。对这些云物理方面认识的不足是天气预报模式停滞不前的另一关键原因(可参见附录中的论文)。缺乏对“简单”降水形成过程的理解是非常突出的中心问题。

云物理学是降水形成过程的核心,同时几乎大气科学、气象学的所有其它学科在降水形成中都很重要。例如,天气学和动力学、辐射学、大气化学、天气预报、数值模拟等。它们在各个尺度的过程中都起作用,均需要更好地理解。观测技术、仪器和观测平台的设计,催化剂的特性及其播撒方法和相关技术,试验设计及评估中用到的统计学知识等,人工影响的成功取决于对这些相关学科的理解程度。我们面临的是大气科学中最复杂的问题之一。各种形式降水过程的研究对人工影响天气的发展极具重要性。对降水过程认识的不足是天气预报模式和气候模式的主要障碍。大气粒子物理学在外场和试验室的研究,从理论上讲还需推广和加强。

统计评估假定播撒和未播撒云(或云系)的样本集是“平均的”和“均质的”。某些特定的特征可用相应的协方差变量描述,但不知它们是否能充分反映实际上更大的物理过程和云的变化?

Knight(1988)曾指出没有两个雪花是相似的,云也如此,因为它们也是彼此完全不同的。例如一个播云试验通常基于相似的催化条件:最低云顶高度、最小雷达反射因子(一般为30 dBZ)、无冰的繁生过程、天气形式类似等。这些条件只是对不同时间和空间尺度,不同环境(包括气溶胶特性),不同降水量、不同降水效率等的降水云过程的泛泛描述。谁敢在时间和空间上平均这些变量?一个平均云的概念是无意义的。我们不能理解“平均云”,然而我们可以理解某一特定的云并能用物理变量和模式推算出人影技术会怎样改变这块云。

有一实例支持我有关防雹的观点。WMO(WMO 1995)将冰雹形成过程分为6个阶段:雹胚竟食水汽的有限增长(利益竞争),早期降水清洗(始于某个雹胚区),云水的冰化,轨迹降低,低效弱风暴单体的碰并加速,动力催化。6个阶段不可或缺。对降水的形成情况可能存在更大的变化范围。这一点从Thomson和List(1999)给出的一次冰雹过程得到了支持。该雹云截面表明云中有我们从未知道的、用1°波束宽度的标准雷达无法识别的小尺度特征(图2)。这一细节是用多伦多大学垂直指向的EEC LARS1988 X波段多普勒雷达观测的,在0~100 s内该过顶雹云的降雹3次击中雷达。由图2右图可见雷达功率谱(它间接表明云中粒子谱)在垂直和水平距离约<100 m范围内有显著变化。仅这一特征便有可能确定该冰雹的形成过程。云体具有平稳的上升和下降气流的假设是太过理想化的。我认为WMO的第3条标准无法得到验证。物理解解必须仅限于特定的单个云体。

可移植性(WMO第4标准)

在冷战政策和各国之间相互不信任期间,很有必要将一个国家的成功试验在世界其它地方重复。实际上,可移植性是非常有弹性的而且易受政治环境的干扰。这一概念仅适用于技术、方法、某些相似的云、概念和周期。物理学和工程学中的相似概念,如雷诺(Reynolds)数,在人影领域是不存在的。

总之,WMO对增雨的标准尚需修改和重定以适合于冰雹的人工影响。

3 技术方面

雷达 由前述冰雹云的例子可知,因为云体和云系变化迅速,必须研制更高分辨率的雷达。现有的雷达完成一个对流风暴的立体扫描需5 min,在此时间内被探测粒子移动的距离量级,不考虑下沉或上升气流,就可能从2 km(雨滴)到9 km(冰雹)。换言之,体资料场是不连续的。雷达体扫的速度需要增大5倍才能避免从固定的第一个高度上的扫描(PPI)到最后一个高度上的扫描PPI的等待时间,这期间会有太多的变化,而且现今1°射束的雷达不能分辨更小尺度的冰雹或雨的演变过程。

采用1 min时间分辨率的电子扫描雷达将大大改进雷达探测的现状。当冰雹回波看上去象下拽的长舌或长片状时(图2 Thomson和List(1999);图3选自Farley和Orville(1999)的一个冰雹云模式),

100 m×100 m×100 m 的空间分辨率对跟踪粒子谱空间上和短时间内的变化也是必须的要求。只要雷达的返回信号是“钟型”射束在截面上的信号沿宽度

的积分值(100 km 处, 雷达射束宽度 1°代表 1.6 km), 雷达径向的高分辨率就没有价值。

播撒标准通常基于某一温度层上第一雷达反

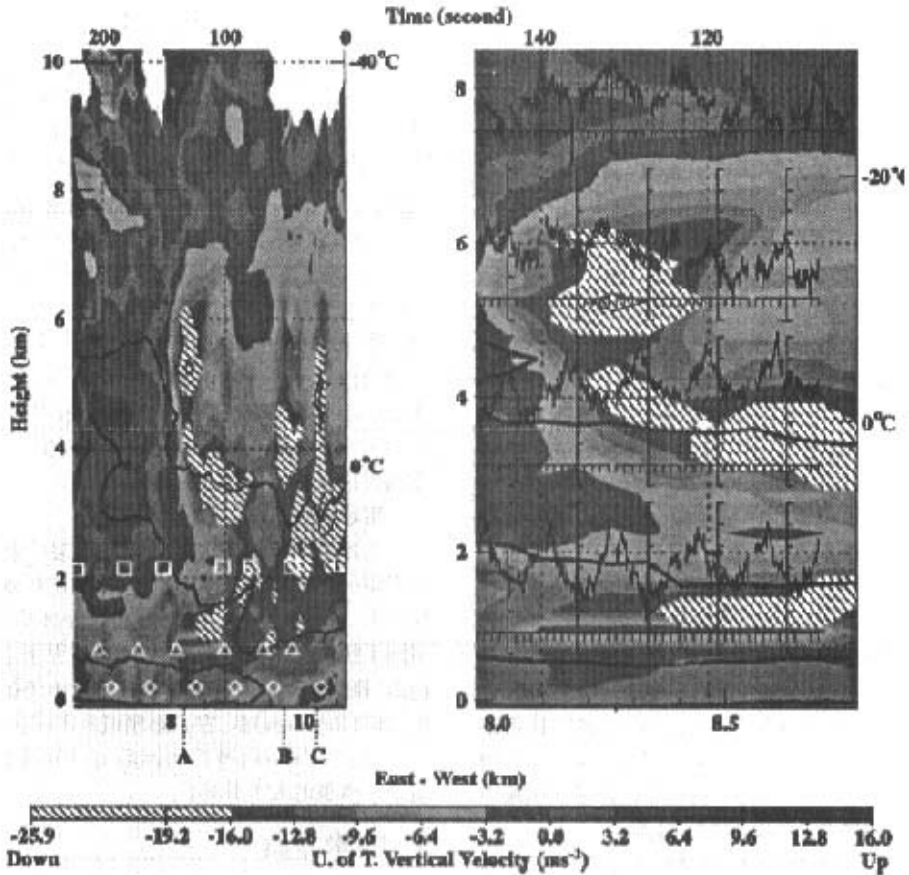


图2 (左)多谱勒雷达对过顶云的垂直指向扫描图。彩色区表示全垂直速度,粗黑线表示 30 dBZ 回波等值线。A,B 和 C 表示向上垂直延伸到 6.5 km 处的负速度高值区(冰雹拖影)自西向东的位置。这些阴影区代表经手工改正过的替代资料。(右)功率谱可作为不同粒子速度的粒子浓度的测量。它们重叠的区域表示降水的高空间变率。各功率谱轴线水平方向从 -16~16 m/s,垂直方向从 -30~40 dBZ(m/s)⁻¹。功率谱坐标轴线的起点 [0 m/s, -20dBZ(m/s)⁻¹]由每个谱线测量处的背景速度资料确定。10 km 以上的干扰资料由信号的低质量造成(见 Thomson 和 List 1999)

射因子(一般为 30 dBZ)。反射因子达到该值时降水过程已经开始,在此之前应存在实施播撒的可能性,但却没有可播撒的具体指标。因此人影外场试验需要高灵敏的雷达和更好的数值预报产品和云模式。

扫描方式遥感探测液态水含量和固态降水还是个未解决的问题。40 a 来用极化方法估测粒子尺度

谱空间分布的探索并不很成功。如前所述,雷达的返回信号与雨的体积的平方成正比,这使得仅用雷达反射因子来解释降水的增加成为不小的问题(参见雷暴识别、跟踪、分析和预报(TITAN)软件系统的应用)。还有,雷达标定的问题也不可小视。

30 a 来极化雷达一直被视为探测雨滴谱(雷达降水标定的关键因素)最有效的工具,但它至今并未

实现。用扫描方式来解决粒子尺度分布还有其他科学上或技术上的选择吗?

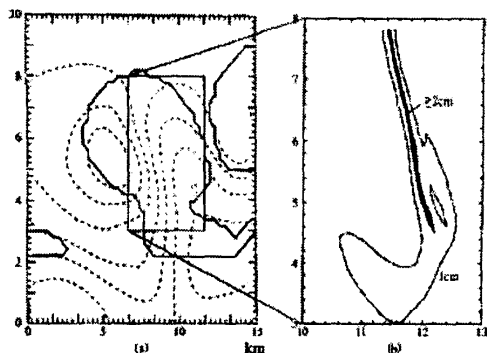


图3 (a)在63分时,含有主要冰雹单体的云状和气流(虚线为等值线)(b)1 cm线(点划线)为雹源区,2cm(黑色区)为触地时粒径达6 mm以上的冰雹区。该图由二维时变冰雹模式得出(据Farley和Orville1999)。注意雹区的知舌形状。

Marshall - Palmer 关系 Marshall和Palmer(1948)建立了第一个雷达反射率与降水率的关系(Z-R),它是基于不同风暴和不同雨强的平均情况的关系式。50 a来虽有这么一个用于任一可能降水的Z-R关系,但它的物理意义却一直模糊不清。最近Rosenfeld和Ulbrich(2003)发现了其中的物理意义,但这还不够,因为云中的粒子谱分布变化很大,更不要说播撒过的云体。

人影中期待的雨、雪增加的量级在10%~20%,然而我们的仪器从雨量筒到雷达、卫星、试验室设备,还有最后一条(但并不次要),就是我们的预报和模式远不能提供所需的灵敏度和精确度。

催化剂的输送 人工影响天气工程只有在适当的时间、以适当的剂量、将适当作用时段的催化剂送入云中适当位置的情况下才能取得成功。对单个云体这些要求很难评判和实现。对大范围的云(场)更是难以实现的任务。中国目前正准备使用的无人驾驶飞机可能是很有用又灵活的输送系统。考虑低空飞行的安全,无人飞机在山区更加有用。

科学和工程 科学家通常关心未证明的理论和概念何时能运用和检验,而工程师的目的在于找出解决问题的方法,即使他们不能被完全理解。在我们理解所有的细节之前,人工影响天气也可能被证明是有效的。工程师和人影作业人员的贡献应予肯定,他们将降水方面的最新知识用于人影作业,不断改进设备、方法和催化剂(快速有效的AgI),并针对比在科学控制的随机试验中更关注的天气现象

提出新的科学见解。工程师和科学家一样,需要不断学习的过程。他们必须现在参与,以便我们的人影试验达到下一高级水准时他们能知道是怎么回事。

4 播撒的大尺度效应

人工影响天气不只是对单个云和风暴的播撒,它也对周围云甚至更大的系统如飓风进行播撒。我们先来探讨一下外围区域效应。

抢钱还债 有关试验本身的各项准备(统计设计,测量技术,物理解释和试验模式)对启动人影试验还不算完备。我们还需应对社会的认知程度并充分考虑法律和环境边界的情况,必要时采取防范措施。科学上最有意思的看法之一是,在某一地区产生降水将减少另一地区的降水,即美国人常说的“抢彼得的钱财给鲍尔”。这会产生社会和政治的反响。Cho和List(1980)指出,播撒产生的强对流可能导致更多的气汽汇集,从而减少天气场其它地区的水分。一项有关外围效应的研究包括了中尺度和天气尺度以及详细的云微物理过程的数值模式。这就要求播撒试验包括人影试验周围区域的降水观测,才能对周围效应作定量分析。

飓风和台风 20世纪70年代美国和菲律宾准备台风影响试验时,中国也很关心这一项目。中国认为越战时期在胡志明路上空的播撒作业是成功的,人工增雨使该路无法行军。中国当时还认为影响台风也是可行的。灾害的减少是受欢迎的,而可能伴随的降水损失却是不能接受的。在加勒比海,总降水的25%以上由飓风产生,台风的人影问题尤为重要。因此热带气旋和季风的播撒应在弄清楚整体效应后再考虑,飓风的播撒也需考虑这一点,应在其登陆前作业以防止意外的灾害。(我主持WMO台风人影会议(WMO 1974)时,大家有所担心,并要求WMO“规定台风干扰作业的24 h限制条件,即台风的播撒试验只能在预计其24 h内不会登陆的情况下进行。”)

美国的天气系统 我们对美国降水系统的了解少的惊人。Carbone等人(2002)发现对流云系统的雷达回波呈波状自西向东移过美国。显然,这些云系的水汽来自南方。最近已开发出针对这方面的基本模式。这些发现给人影的启示是:不要试图在自然条件不利于降水的情况下增加降水。(热带降水观测计划(TRMM)的资料表明,有相似的降水系统

移过印度尼西亚。)

降水循环的增加 增雨不仅指通过影响云产生更多的降水,也可能指加快水循环或增加整个或部分的水循环。陆地降水就是地面雨水蒸发、产生云或风暴,随后降水到地面的一个水循环过程。这里未考虑生物系统的水,而且假定该蓄水层无水分损失,因为其中的水可抽出用于农业灌溉。唯一可能的损失是进入河流的径流。这可在人为控制之下,使其净效果等效于一个真实的水循环,即同样的空中水更频繁の利用。

气候方面 人影已开展了20~40 a的时间,现在有理由使其再上一个台阶。气候的变化使降水带有可能从农业区移向非农业区。例如,美国高原和中西部的雨带是该区域旱作农业的有效支撑,它有可能移向较贫瘠的土地。不考虑土壤的改良,仅农业生产设备有可能重造和搬迁的费用将达万亿美元。人影能缓解这样的过程吗?

5 数值模拟

数值模拟涵盖人工影响天气的各个领域,从物理解到理论上设想的试验进展效果检验,再到资料同化及不同尺度过程的参数化。模式的基础是我们所认识降水过程的物理学,没有物理方程就没有有价值的模式,经验公式只是事件的描述,没有科学解释。

参数化 所有的数值模式都是以更小次网格尺度的参数化为基础的,参数化的目的在于不必要对每一水分子、气溶胶粒子、云滴、降水粒子群或云体等行为逐一进行模拟,这在不同尺度、直到气候模式和地球系统模式都是适当的作法。好的参数化虽粗略简化但能相当正确地描述现象的实质。最令人吃惊的例子是云物理学中降雨形成过程的Kessler参数化,其本质内容是液水含量的临界值和不同的变化速率。Kessler(1969)提出这一想法之后又将其定量化,30 a来无人超越这一认识。

数值模拟需要试验人员和观测者将他们的资料(结果)参数化以便用于更高层次的模式计算。这方面的工作仍需继续,现存的各种参数化方案应在更好的测量和概念方面有所改进。

预报模式 如果天气预报是完善的,即在某一环境下的某一天气过程的物理解是充分和准确的,那么人影试验的评估将会变得容易。正因为实际并非如此,有必要提问天气预报对人是有益的

吗?显然,天气预报在某一局部的降水预报精确度绝对不可能好于10%~20%,但天气形势和云的类型的确预报对播撒对象和时间的确定是非常有用的。

当W. R. Cotton(2001,个人交流)和他的研究小组用天气网资料模拟几年前发生在Colorado州FortCollins的洪灾时,模式模拟出的灾害位置与实况不符。由此引出另一个与人影有关的问题,即更细的气象观测在多大程度上能改进预报?在平坦的试验区域,中尺度观测网在多大程度上有助于人影试验?对山区和山谷情况会如何?Bernardet等人(2000)也提到前述的某些问题和限制。这类开拓性工作需要加强。

总之,在预报对流云系统降水方面的技能是有限的,而且没有能力在气候和气候变化模式中预报降水。因为天气活跃的气溶胶、云滴核和冰晶核的作用在气候模式中未予考虑,而他们的作用效果却比全部气溶胶的辐射效应大2个量级:降水决定气候。

人影相关模拟 数值模拟一直是气象试验人员和观测员作定性和趋势评估的工具。然而,模式还需提供以下几方面的内容。

(1)可催化性的评估 在试验前用具有详细微物理过程的3维时变云模式试验播撒假设及其结果是很有价值的。Z. Leven和他的研究小组已成功检验了云对播撒类型、播撒物、播撒高度、播撒剂量及与云演变相关的播撒时机、作业时段等的敏感性(Resin等人1996;Yin等人1999)问题。

(2)从以日为单位的播撒转向云系中单个云体的催化作业,需要用中尺度模式研究云与云之间的相互作用。模式研究可能得出播撒云与不播撒的控制云之间的最小距离,从而得到试验区内各云体的最佳多平行播撒方案。将尽可能多的播撒云体和播撒的控制云体纳入1 d内的试验云系可缩短整个播撒周期,且不会降低结果的置信度。需注意,卫星对降水云外流的观测可能受到某些限制(J. Purdom 2003,个人交流)。

(3)模式还能检验对存在自然相互作用云系的试验区内某一单个云体的播撒是否增加或减少整个云系的降水总量。

(4)“抢钱还债”问题的数值模拟需要进一步研究。

(5)至于通过系统内的播撒作业产生的降水增

减,也应结合天气系统的降水性质和系统自身的限制,在天气学层面对其进行研究。

(6)考虑到加拿大南部草原的径流可 $<10\%$,人影增加的大尺度水循环问题也应重视。

同化模式 用同化模式外推由雨量筒、雷达和其它可能的观测系统观测的综合资料,得到地面降水量是一项非常重要的工作。

现今的计算机能力还不够。事实上美国国家大气研究中心在过去几年里已经使它的计算能力提高了4倍多。然而,在未来10a为了模拟各种形势的降水和不同尺度直到气候模式,包括播撒条件和敏感性问题的,需要再提高几个“4倍”的计算能力。天气预报中的计算机增强综合模式预报方法也应应用于云和中尺度模式。

6 总结、评述和项目

目的 最先进的现代人工影响天气工程(增雨)的目的在于产生、检测并理解 $10\% \sim 20\%$ 的降水增加和证实试验之后1a内的效果。人影的困难在于不能尝试从天气预报、气候模式或其它气象学领域验证它的效果。

总体现状 人影总的状况简单表述为:雾和层云的消散已业务化;增雨作业也被证实是有效的;防雹的效果还没有随机试验结果的证明;对龙卷和台风的人为干扰(影响)是危险的,即使它有效也存在法律上的障碍,仍有待于科学认识的提高;减少暴雨和其它灾害性天气危害的人影还难以企及。

人影科学 所有降水过程的研究对人影的突破都具有极重要的意义。降水过程的研究也会给天气预报和气候模拟带来重大推进。

统计学、统计设计和评价方法及工程技术诸学科在人影方面的研究仍需加强,以期探测技术、观测平台、播撒催化剂科学和催化剂输送方法更加完善和精确。

美国国家降水研究和人影项目 由上述内容可见开展一个综合协调的美国全国性降水研究和人影计划的必要性。该项目应包括降水研究的所有方面,从实验室到计算机模拟、外场测量、人工影响降水(天气)实验、天气和气候模式的应用及相关的环

境和法律事宜。该项目还应由来自学术界、政府部门、私人、社团和政治组织的高层指导设计。

这类项目的所有子项目应目的明确,并在总体计划完成时同时开始,须注意并没有一个子领域是成熟的。

有关第一类人影(雨、雪、冰雹、龙卷、飓风、其他灾害天气等)项目的决定权应由领导层掌控。从有把握的项目开始是明智的。

人影试验应按已往成熟的步骤,即:概念模式的提出,外场地挑选,试验场地研究,随机试验及其效果评价。外场研究应包括现有最好的设备并充分利用各个方面的知识资源,包括私人团体的经验和优势。播撒作业应与考察项目结合起来以便检验已有的认知是否被催化云体的某些变化所验证。

资金方面 用催化剂干扰和诱导天气过程的人影科学一度很有吸引力,因为用很小的能量便可影响巨大的大气能量,因此所花费的资金相当有限。当然,这只是相对意义上的经济。现在看来这并不意味着便宜。大气相关的灾害据估计仅在美国每年的损失可达几百亿美元。旨在影响灾害天气的催化试验的设计、数值模式开发、仪器研制、观测平台建设、和试验本身5a期间的花费可能达10亿美元,但不只是这些。还需要有一批受过良好教育和培训的所有大气科学领域相关的专业人员,富有想象力的科学家和有远见的政治家,他们的开销自不必说。考虑到美国每年在气候变化研究上的费用为17亿美元(Lautenbacher 1992),下一年度的预算将达50亿,这部分花费不算奢侈。

总结评述 从长远看人影前景是光明的,越来越多的事实表明基本概念是正确的,成功的人影作业实施是可行的。人影无疑是有效的。自然界本身在巨大的尺度上进行着天气影响过程:在大陆上的云与云系由于大量的微小云凝结核(CNN;多由生物体燃烧产生)在移回海洋时,通过吸收海盐核被激活,因而再次产生降水(Rosenfeld(2003),后被R. Brintjes(2003,个人交流)证实)。这只是天气影响的常见现象,但足以说明天气影响的存在和效果。

周跃式、俞亚勋译自于《美国气象学会公报》(BAMS)2004年1月刊