

黄美元. 2011. 我国人工降水亟待解决的问题和发展思路 [J]. 气候与环境研究, 16 (5): 543–550. Huang Meiyuan. 2011. Urgent problems and thinking of development for precipitation enhancement in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (5): 543–550.

我国人工降水亟待解决的问题和发展思路

黄美元

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 世界上人工降水(或人工增雨)已有60多年历史。几十年来人工降水取得了很大发展和成绩。但是到目前为止, 人工降水仍存在着许多科学与技术问题亟待解决, 科技水平有待进一步提高。首先需要加强人工降水的若干关键技术研究, 如作业云的预报、识别指标、优化作业方法等, 最大可能地降低作业的盲目性; 人工降水的效果检验问题, 一直没有很好地解决; 人工降水的科学储备不足等。目前我国人工影响天气需要从战略上、从发展的技术思路上进行变革, 要避免走老的发展道路, 要积极推进这些问题解决, 才有望获得突破性进展。提出了要发展4项人工降水的关键技术方法: 开展短时、局地的云和降水预报; 要善于识别, 选择可人工增雨的作业对象(云); 要优化人工降水的作业方法; 科学地进行人工降水的效果监测和对比分析。

关键词 人工降水存在的问题 人工降水的关键技术 人工降水发展思路要改变

文章编号 1006-9585(2011)05-0543-08 **中图分类号** P427 **文献标识码** A

Urgent Problems and Thinking of Development for Precipitation Enhancement in China

HUANG Meiyuan

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Research in precipitation enhancement around the world has a history of over sixty years. Over those decades, there have been significant development and progress in precipitation enhancement. However, until now, many scientific and technological problems associated with precipitation enhancement demand urgent solution. Hence, we have to improve the scientific and technological level. First of all, research in some critical technologies such as prediction of seeded clouds, indexes for selecting clouds, and optimization of seeding methods needs to be emphasized so as to reduce the degree of blindness to the utmost. In addition, the evaluation of weather modification attainments has been perplexing scientists without an ideal solution. Scientific reserves including understanding of basic cloud seeding technology, modern observational equipment, and high-tech talent are not enough as well. At present, to make breakthrough in weather modification, we have to reform in terms of strategy and technology application and avoid following the old routine. Four critical technologies of developing precipitation enhancement are proposed in the present study, including conduct short-time, local prediction of clouds and precipitation, having a

收稿日期 2010-01-11 收到, 2011-04-23 收到修定稿

基金项目 “十一五”国家科技支撑计划重点项目 2006BAC12B00-01-06, 国家自然科学基金项目 4077500

作者简介 黄美元(1934~2010), 男, 研究员, 毕生从事云物理、人工影响天气及大气环境的研究。

good indexes to identify and selecting clouds suitable for rain enhancement, optimizing methods of artificial seeding, and conducting evaluation through control observations and comparative analysis scientifically.

Key words problems associated with precipitation enhancement, key technology of precipitation enhancement, thinking of development for precipitation enhancement must be changed

1 引言

中国开展人工降水有 50 多年历史,而在美国已有 60 多年历史。几十年来人工降水有很大发展,有很多成绩(Hess, 1985; 黄美元等, 2003; 黄美元和雷恒池, 2008; 胡朝霞等, 2007; 赵震和雷恒池, 2008; 中国气象学会, 2008; 侯团结等, 2011)。如,发现了几种有效的冷云催化剂和暖云催化剂;发展了冷云催化降水理论、暖云催化降水理论;发展了几种实用的催化剂播撒技术和多种云、雨直接和间接探测技术、方法及仪器设备(如飞机云雨粒子探测系统、多种雷达和微波辐射计系统、卫星和地面测云和测雨系统等);近 30 多年来,在云雨模式及云的数值模拟计算方面有突飞猛进的发展。到目前为止,大体上有能力数值模拟多种主要类型的云和降水的发展全过程,也大体上可以模拟计算人工降水的全过程;等等。因此,在我国和世界上有些国家或地区把人工降水看作是一种有前途的防灾、减灾技术来试验和应用。

但是到目前为止,我国和世界人工降水仍存在着许多亟待解决的问题(Gabriel, 1967; Gabriel et al., 1967; Hess, 1985; William et al., 1999; 黄美元等, 2003; 黄美元和雷恒池, 2008; 中国气象学会, 2008)。人工降水的科学水平不高,而且没有充分利用近、现代云物理学的成就,在一些重要方面仍停留在 20 世纪 50 到 70 年代的水平。人工降水的若干关键技术方法没有科学地发展起来,如人工降水作业的盲目性较大;人工降水的效果说不清楚;人工降水的科学储备或准备不足。这些问题的存在显著地加大了人工降水效果的不确定性,几十年来一直处于争论中,无论是有效果说还是无效果说都不能提供确切的科学证据来说服对方。如果人工降水发展思路再不进行重大的变革,再沿着老路慢慢地走下去,就不可能再有重大的突破性进展。

2 我国人工降水中亟待解决的问题

2.1 人工降水作业对象(云)上的盲目性

作业对象(云)的盲目性主要表现在没有完整的、客观的、科学的作业选云条件或指标。

哪些云是不能作业的?因为对它们作业是不可能或只有很小可能性(如 $\leq 10\%$)会产生增雨。哪些云是可以作业的?因为对这些云作业,有较大可能性(如 $\geq 80\%$)会产生人工增雨。几十年来在人工降水活动中,对作业对象的选择没有引起足够的重视。对什么样的云不该作业,对什么样的云应该作业,需要建立科学的识别指标。

在人工降水的初级阶段(Gabriel, 1967; Gabriel et al., 1967; Hess, 1985; 中国气象学会, 2008),在播撒 AgI 和干冰等催化剂时除注意在云的负温区(如 $\leq -5^\circ\text{C}$)进行外,对作业云的其它条件,如云厚、云中过冷水含量、云中上升气流、云的发展状况等都没有关注,缺乏观测数据。其实从云物理学可知,播撒后可以产生大量的冰晶及降水元,希望这些降水元在云中增长成降水粒子并降落到地面。但是要实际产生这些过程,对云是有条件的,不是对任何云作业都能有人工增雨的效果。很显然对于很薄的云和云中过冷水很少或没有的云,这些冰晶和降水元不可能长大成降水粒子。因此不进行选云的作业必然有很大的盲目性,可能其中有不少作业是对不可能产生增雨的云进行作业的,其结果当然无效,这给效果的统计检验带来严重的混淆和困难。

有一些地方进行人工降水,由于对天气和看云识降水有些经验,所以从天气形势、云层厚度、是否发黑等方面出发来判断作业对象(云)是否合适。而有一些人工降水试验或作业,选择哪里降雨,飞机就去哪里作业。这些都缺乏客观、定量和科学的标准。对已经降雨的云再去作业,不一定能增雨,可能那块云已处于消散过程或本身没有增雨潜力。在有些人工降水作业中,也有一

些定性或定量的、不完整的指标,如地对地形云作业时,以 500 hPa 上的温度低于 -10°C 、云中冰晶浓度小于 1 L^{-1} 、云厚大于 2 km、云中过冷含水量大于 0.2 gm^{-3} 等作为指标。这些人工降水对作业云都有 1~2 个定量指标,但问题是选取 1~2 个参量值作为指标,能概括成功(即作业后能够增雨)的概率是多少?这一问题在这些人工降水作业中,都没有明确说明。另外如果满足以上 1~2 个指标(或多个指标),自然云产生降水的概率是多少?如果进行作业,人工增雨的概率是多少?若以上问题不清楚,那么这样的人工降水作业仍然是盲目的。

20 世纪 60 年代兴起的人工降水随机作业,被认为是科学的。国际人工影响天气委员会也多次推荐人工降水应随机作业,但他们的随机作业在一定程度上是“随意作业”,它不需要选云。以色列窜渡随机作业(Gabriel, 1967; Gabriel et al., 1967; Hess, 1985),把晴天无云日也作为作业日,从设计上说也应列入效果检验的样本统计进去,这是不合理的。对没有云的晴天,播撒 AgI 无法产生降雨。可见反对选云或不重视选云,必然导致不科学的作业。因此选云作业是人工降水一项关键性技术,要科学选云,建立一套识别和选定作业云的客观、定量、完整指标。即通过大量的雷达和飞机等对当地要作业的云型进行观测和分析研究,建立一套由云的宏微观参量值组成的指标,以提前识别云的自然和人工降水的可能性,并要求这套指标的识别正确率(历史资料概括率)达到 80% 以上。

2.2 人工降水作业方法上的盲目性

人工降水作业方法的盲目性主要表现在:

(1) 不管当前作业云的特点和条件,往往采用事先已经认定的、大体上相同的方法去作业。例如,冷云作业的催化剂剂量应该根据作业云的自然冰晶浓度、过冷层的含水量及过冷层的厚度等参量的不同,剂量应该有所不同。但在许多人工降水作业活动中(Hess, 1985; Beriouliev, 1999; Henderson et al., 1999; Koloskov et al., 1999; William et al., 1999; Terbinche, 1999; Warburton, 1999; Semsar and Pahlavanhasseing, 2007; Morrison et al., 2007; Abdouleys, 2007; 中国气象学会, 2008),他们事先已有一种

估计作业剂量,在实际作业时不去根据作业云的实际数据来决定作业剂量。而且许多人工降水作业,在作业前缺乏对实际云的观测。事先设定的作业剂量是否符合当地人工降水的作业对象(云)?什么叫播撒“过量”或“剂量不足”?不同播撒剂量、不同播撒部位、不同作业时机等对人工增雨效果有什么影响?往往没有认真研究过,没有定量计算过,常常是“人云亦云”,没有针对本地、本季节的人工降水对象(云)进行认真的观测研究。这样进行人工降水作业,存在很多盲目性是难以避免的。

(2) 没有把催化剂播撒到云中起作用的部位。有些人工降水活动中(Hess, 1985; Koloskov et al., 1999; William et al., 1999; 中国气象学会, 2008),把冷云催化剂的播撒位置放在地面、云底高度或 0°C 层高度上下,希望靠上升气流和风的输送及湍流扩散,输送到云中冷云催化剂起作用的部位,但他们除了有一些粗略的估计外,并没有根据现场实测资料进行过较精确的计算。所以,播撒后有多少 AgI 到达云中起作用的部位、要经过多长时间,这些都不清楚。因此,这种播撒从理论和实际上能否引起人工增雨,何时何地能有人工增雨也都是一笔糊涂账,这也是一种盲目性很大的作业方法。

2.3 人工降水效果说不清楚

几十年来,人工降水的效果是人们十分关心的问题。从 20 世纪 40 年代开展人工降水试验起,对人工降水的效果一直有争论,争论了几十年,目前仍未解决。这个问题的解决要靠科学数据的证明,要靠客观、科学的人工降水效果检验。几十年来效果检验方法上有很多进步,从凭眼睛看、凭经验判断发展到用统计方法来检验。从 60 年代起用随机作业的统计方法来评估效果,目前已过去了 40 多年,但是经过随机作业检验后,能肯定人工降水有效果的例子很少,而且对这种检验方法也有疑问:

(1) 在人工降水的初期或初级阶段,人工降水结果的分析只有口头或文字的描述,没有科学数据的对比。对效果检验实际上没有认真考虑过,以为凭眼睛看、凭经验就可以判断人工降水效果,其实不然。没有对比(与自然状态下的云雨对比)是难以判断是否有人工影响作用的。有的人工降

水专门选已在降雨的云去作业,这样作业后仍在降雨就认为作业后有雨,说明作业有效果,或者根据作业后出现的地面雨量中心与作业影响区很接近,判断为人工降雨作业出现了地面降雨的极大中心区。但是,怎样排除该雨量极值中心不是自然降雨的结果呢?

(2) 20 世纪 60 年代起,有一些人工降水活动开始用“目标区”(影响区)和“对比区”的统计对比方法来检验人工降水的效果,如历史回归法、区域回归法、随机作业统计法等,但是这些方法仍然存在着不少科学问题。这里着重指出这些方法在两方面存在的明确缺陷。下面以随机作业统计法为例,给以分析。

1) 由于作业对象没有限制,而且不加选择,参与统计的样本明显不足。作业的云和不作业的云不能保证有相同的或相似的属类,即不能保证对比的两组样本原属于同类,而只是作业与不作业的差别。

如国际上著名的 1961~1967 年以色列人工降水试验(Gabriel, 1967; Gabriel et al., 1967; Hess, 1985)用随机“窜渡”作业,采用被认为是“严格”的统计方法来检验效果,该作业以天为单位,随机选择该日是否作业,统计单元是日降雨量。事先随机选定一个作业区,一个对比区。从 1961~1967 年,共在两个区作业次数为 $197+167=364$ 天。因为只在两个区的一个区作业,另一个区作为对比,所以作业日和非作业日都为 364 天。但是由于该试验对“作业日”没有任何限制或条件,虽然是随机选择,却是“任意”选择,什么样的云况都有可能被“随机”选入或不被“随机”选入。所以被选为作业的,有完全没有云的晴天,对晴空播撒 AgI 不可能降雨。当然也有些日子是很弱的淡积云、没有过冷云水的小积云、云顶高、含水量大的云(有降大雨的日子)、也有含水量很小的云。上述各种情况都有可能被选入作业日或不作业日。由于他们对当天的云没有观测记录,所以无法保证作业日的云况与非作业日的云况相同或相似。不同的云况,作业后人工增雨的可能性是不同的。如果只有 2~3 种云况,作业 364 次,从统计上说次数是够多了。但当云况有 20~30 种时,364 次作业次数就不够了。所以这种随机作业的效果统计对比,不只反映了增雨

结果的差别,也反映了作业日与非作业日选云不同的结果,这样的试验不能正确说明人工降雨的效果。

这个问题存在于各种目标区和作业区的对比,如历史回归对比、区域回归对比、随机作业对比等。

2) 由于选定的作业影响区和对比区的时空坐标位置缺乏科学依据,其对比分析也不可靠。现阶段人工降水效果检验中的统计对比,常常是事先选定或粗略估计确定作业影响区和对比区。对比什么时间段内的雨量也是事先设定的,如对比 3 小时的雨量、6 小时的雨量或日雨量等,但是这些选定及估算都带有很大的任意性,缺乏科学依据。如对层状云或积状云作业,作业有一定的区域,作业时间有一定的时段,那么作业后,如果能够人工增加降水,应该在哪里出现?何时出现?人工增雨能延续多长时间?明白这些问题才能选定对比区和影响区,才能选定作业后用何种时段内的雨量进行对比。

如在上述以色列人工降水试验中,他们设置了两个区域(北区和中区)进行随机窜渡作业,并假设(很粗略地估计)作业后影响区在下风方向 15~25 km。但实际上北区在作业播撒线下风方向 12~48 km,中区在作业播撒线下风方向 16~35 km。二者的面积和形状也不同,北区比中区大约 1.6 倍,北区似菱形,中区则呈三角形。每次作业日和非作业日的风速和风向都一样吗?不同的云况(云中上升气流、云厚、含水量等)下,云中从冰晶到降水形成的时间是一样的吗?两个用于对比雨量的区域,其位置和面积都合适吗?真正的增雨范围真的落在这两个区域里吗?应该说该试验盲目性很大。以色列的试验仅以日平均降水量为单元进行统计,他们在云底高度播撒 AgI,每次作业平均约 3 小时。为什么要选择作业后 24 小时内的雨量,作业后增雨时间为什么不会短于 24 小时也不会长于 24 小时,这些都是盲目地设定,没有多少科学根据。

到目前为止,这些问题都还没有被科学地回答过。少量初步的人工降水数值模拟表明,人工降水的效果相当复杂,有的地方有的时间段内会产生增雨,但是另一些地方在另一时间段内会减雨。作业后何时在地面产生增雨或减雨,增雨时

段的长短与作业方法（如作业剂量、部位）有关。如果我们的科学储备还不能对上述这些问题有一些基本的认识，我们就无法进行对降雨效果的对比分析以及对作业降雨效果的统计检验。

2.4 人工降水的科技储备与准备不足

几十年来在人工降水活动中暴露的许多问题反映了在人工降水方面的科技储备不足，对人工降水的深入研究不够。从云物理学必然得出人工降水是有条件的基本观点，但我们对这个“有条件”认识不足、重视不够。当发现干冰和 AgI 是较好的冷云催化剂后，以为冷云人工降水问题就解决了，而且可以推广到人工防雹、人工消雾、甚至人工削弱台风。晴空播撒 AgI 能产生降水吗？对卷云播撒 AgI 能产生降水吗？对很薄的云或含水量很小的云作业能产生降水吗？从云物理学分析，以上显然是不可能的。但在实际人工降水作业中就没有明确的设立“禁区”，这是一方面。另一方面，更重要的是要明确提出哪些云适宜作业，有什么条件的云是可以作业的，作业后人工增雨的可能性才很大（如 $\geq 80\%$ ）。显然不同类型的云有不同的条件，不同地区、不同季节的云也有不同的条件，要具体地、有针对性地去研究。当然如果改变用冷云催化剂的方法，如用暖云催化剂、人造上升气流等方法，则对云和大气有不同的要求条件。

人工降水的效果检验是非常重要的，但目前不能拿出科学的数据证明人工降水的定量效果，这一问题一直困扰着人工降水工作者。近几十年来提出的多种统计检验方法，一般都依靠对作业影响区和作业非影响的对比区的对比。但这些方法一直存在两方面的问题，一是对比的前提条件不一样，即统计对比的零假设不成立。二是作业影响区和对比区的雨量对比位置和时段的确定比较盲目。这两方面都没有深入研究。至今我们仍然不知道，在人工降雨作业后，如果能增雨在什么地方出现、增雨从什么时间开始、延续多长时间。

有些地方在开展人工降水前没有做必要的科学准备，对当地的云和降水的宏微观结构特性、形成和发展过程了解甚少。不了解在当地常见的云中，哪些云是可以人工降水的（可以人工增雨）、出现的概率多少、对这些云用什么催化作业

方法效果最好。有些地方开展人工降水，他们租用一架飞机播撒冷云催化剂，但没有云物理的高级科技人员参加，只由一名普通的气象人员指挥作业，没有什么机载仪器，作业前后也不认真进行雷达等观测，从未取得足够的云宏微观结构资料，也不进行认真的效果检验。这样的作业，无法说有效果，效果说不清楚则无法说明搞人工降水的意义。

国内外有人注意地形云的人工降水，但科技装备非常缺乏。他们就在山脚下进行地面烧 AgI 播撒，希望 AgI 粒子输送和扩散到云的负温区。他们没有什么观测，也不观测云顶高、负温区厚度、云中含水量等，对当时该地风和湍流扩散状况也没有什么监测。AgI 粒子究竟扩散到哪里去了，是否起到了作用，如果有增雨，落在哪里，什么时间开始增雨，这些问题一概不清楚。这样统计对比作业和不作业时的雨量（降水量）不能说明什么问题。

3 要重视发展人工降水的一些关键技术方法

在人工降水中，在基本明确了科学人工影响方式（如播撒冷云催化剂、暖云催化剂等）和人工影响原理（如在云中播入大量冰晶后，冰晶如何增长成降水粒子的物理过程）之后，还有一些关键技术必需发展和完善：（1）云和降水的预报，即要对未来的云和降水有预测，这样才能准备建立对该云进行人工降水作业的预案，也为效果检验提供一种对比依据；（2）识别和选择作业对象（云）的技术，事先要建立人工降水可以作业和不可以作业云的条件（指标）。要在作业前，通过观测、识别和选择哪些云是满足指标要求，是可以作业的，哪些云是达不到作业指标，是不能作业的；（3）讲究人工降水作业方法。要选择优化作业方法，以确保最大的人工增雨效果；（4）进行客观、公正和科学的效果检验，应该采取多种、公正的对比分析，要有较强的说服力。

3.1 开展局地、短时的云和降水预报

在人工降水活动中，开展云和降水的短时预报十分必要，一是为人工降水做好准备，事先建立人工降水作业的预案，“不打无准备之仗，打仗

先了解敌情”；二是为人工降水的效果检验提供多种对比，如果实测作业区的云和降水与预测的相当一致，则人工降水的效果更可信。应当开展短时及超短时的当地有限区域云和降水的数值预报：（1）开展这种云和降水预报是很有必要的。开展人工降水是需要做准备的。在未来 6~24 小时内可在作业区域内是否有进行人工降水的机会、云的条件怎样、是否达到了人工降水作业的选云指标，根据预测的云和降水情况选择和建立人工降水作业方法（时间、部位、剂量等）的预案。预先计算可期望的人工增雨雨量，作为事后人工降水多种效果分析的一种方法；（2）开展这种预报是有难度的，但是要达到一定正确度是有可能的。目前大范围的定量降水预报水平不是很高，但是近十多年来 1~2 维和三维云模式发展很快，已开始用到中尺度的降水预报中去，取得了明显的进展。未来 5~10 年，可望有较好的结果。

短时、局地的降水、降雹预报，有它容易的一面。国内的短时局地的降雹预报（有无降雹或降雹分 3 级）曾试验过，正确率可以达到 80%。

在预报过程中，可以利用气象资料、雷达、飞机、地面对云和降水的监测资料，可以进行类似四维同化的订正。

3.2 要善于识别和选择可增雨的作业云

上面已经指出，人工降水是有条件的，不是对任何云作业都能达到人工增雨的目的。对有些云作业是可以人工增雨的，但对另一些云作业，基本上不可能人工增雨。因此想取得人工增雨的良好结果，必须选择人工增雨可能性较大的云进行作业。在这方面要有科学储备，对本地某季节中哪些云（或满足什么条件或指标的云）作业后会有较大可能性（如 $\geq 80\%$ ）增雨，哪些云（即不满足什么条件或指标的云）作业后只有很小可能性（如 $\leq 10\%$ ）会增雨。即要建立识别有较大可能性会人工增雨的云条件（或指标）。要明确指明，该条件（或指标），它的历史资料概率是多少（一般要求在 80% 以上）。

经过大量的观测分析和数值模拟，可以建立识别可增雨云的指标。应该认为利用雷达、飞机、卫星及地面等的观测，取得大量本地区人工降水对象的（冷性层状云、对流云、地形云等）云的宏微观特征和降水特征的资料，统计分析短时间

内云的宏微观特征与该云降水特征之间的统计关系，建立根据该云的宏微观特性判别该云降水量的指标，并明确给出该指标的统计概括率。根据我们对层状云 3 层模型的研究和吉林春季降水性层状云的分析研究（胡朝霞等，2007；黄美元和雷恒池，2008；赵震和雷恒池，2008；侯团结等，2011），层状云可以用 5~7 个云的宏微观特征作为指标，即第一层（冰晶层）底的温度、第二层（过冷层）的厚度、第二层的含水量、第三层（暖层）的厚度、第三层的含水量、 0°C 层亮带的雷达回波强度，当然还应考虑云的发展状况。这是一套识别层状云的自然降水强度的指标。对它还要经过多次云数值模拟的计算研究，进一步概括出识别人工降水作业后可增雨云的一套指标，也要给出概括的正确率。这些指标的参数（宏微观特征量）应该有普遍意义，但具体数值在不同地区不同季节应该有所不同，各地应该对本地区的云进行观测和研究。提出适合本地区的人工增雨作业云的识别指标。

3.3 要优化人工降水的作业方法

人工降水作业方法很有讲究，把催化剂随意对云播撒，不是科学方法，不会取得良好的人工增雨效果。

（1）把人工影响直接施加到能起作用的云中部位。例如用冷云催化剂，则需把催化剂直接送到云中合适的负温区，这样可以定量计算催化的剂量、时间、部位是否合适，催化能否产生人工增雨。如果采用间接方法，把催化剂先施放到地面、云底、云中某高度，希望靠输送和扩散到起作用的云中合适部位，又由于当时没有足够的观测数据，无法精确估计到达云中起作用的合适部位时还有多少催化剂量、什么时间到达，使催化效果变得更加难以确定。对层状云或对流云的人工降水作业，采用飞机、火箭、高炮等直接在云中负温区部位播撒或施放焰弹，是比较合适的。

（2）要针对具体云特点，采用优化作业方法。云物理的理论和数值模拟指出，对同一块云采用不同的人工降水作业方法（指不同的催化剂、不同剂量、不同的催化部位和时机、催化次数等），会有不同的人工降水效果。其中一般有最优的作业方法，我们应该尽量采用优化的作业方法，求得尽可能好的人工增雨效果。而且对于不同的云，

即具有不同宏观结构的云,其优化作业方法也不同。我们应该对当地进行人工降水地区的云,适合进行人工降水作业的云进行研究,总结出几种典型云的优化作业方法。

在实际人工降水活动中,应该通过选云和降水的数值预报,进行云的数值模拟计算,建立对该云人工降水作业的优化预案,再根据当时的实时观测和积累的研究结果,做出最后的人工降水优化作业方案。

3.4 科学地进行人工降水效果的监测和对比分析

人工降水的效果检验十分必要,没有检验不能说明人工降水的效果。不清楚人工降水的效果,就说不清楚人工降水的意义和价值。由于效果不清楚,怎样改进及怎样去提高都无从下手。多年来,由于效果检验问题的难度很大,许多人想绕过这个难题,没有信心突破这个难题,这是不科学的。应该采用每次人工降水作业,都进行人工增雨效果的监测和对比分析,以物理检验为主。全年作业,再进行全年的效果检验,即在物理检验的基础上,再做统计检验。

在效果检验的对比分析上,要特别注意以下3个原则:(1)对比时一定要具有相同或相似的云雨条件,即除作业区(或作业云、作业时段)的降水量与对比区(或对比云、对比时段)的降水量相同或相似外,还要求作业区的云和对比区的云在人工降水作业后有相同的人工增雨可能性(或概率),因为两个区域中平均降水量相同或相似,不能保证两个区域的云在人工降水作业后人工增雨的可能性也相同。应根据识别可人工增雨云的指标,来判别两个区域可人工增雨云的相似程度;(2)要尽可能明确作业后产生效果的真实影响区域和时段,即效果影响区的时空坐标不能盲目设定,要根据实验和数值模拟等的研究来确定;(3)采用多种对比分析、增加说服力。至少可以考虑有4种对比分析其效果,即:短时预报该地区的降水量与实际降水量的对比;预报人工降水作业后的降水量与实际降水量的对比,包括作业影响区时空坐标内外的两种对比;作业影响时空坐标内,实际的降雨量与四周、前后降雨量的对比;作业前后飞机、雷达等观测资料的对比,包括时空两方面的对比。综合以上各种对比,做出本次作业效果的评估。

可以看到,贯彻发展上述4项人工降水关键技术方法,要充分利用云物理发展几十年来,在观测技术和数值模拟两方面的巨大进展,发挥云物理的观测技术(如测雨雷达、飞机、卫星和地面)和云物理的数值模拟在人工降水活动中的重大作用,这是时代的要求。现代人工降水活动,就要靠此两项技术支撑。

致谢 在本文形成过程中,曾与洪钟祥、周晓平、徐华英、雷恒池、郭学良、肖辉、洪延超、沈志来、金德镇、胡朝霞等研究员们分别讨论过。感谢他们提出的宝贵意见。

参考文献 (References)

- Abdouleys S. 2007. An overview of Senegal rain enhancement programmed (SENREP) [C]. Proceedings of the Ninth WMO Scientific Conference on Weather Modification.
- Berioulev G P. 1999. The precipitation enhancement experiment in Yakutia (Russia) 1995-1997 field seasons [C]. Proceedings of the Seventh WMO Scientific Conference on Weather Modification, 1: 101-104.
- Gabriel K R. 1967. The Israeli artificial rain simulation experiment. statistical evaluation [C]. Proceedings of the Berkeley symposium on Mathematical statistic and Probability, 5: 91.
- Gabriel K R, Avichal Y, Stainberg R. 1967. A statistical investigation of persistence in the Israeli artificial rainfall stimulation experiment [J]. J. Appl. Meteor., 6: 323-325.
- Hess W N. 1985. 人工影响天气和气候(王昂生等译)[M]. 北京:科学出版社, 158-199, 200-244, 299-315, 316-344.
- Hess W N. 1985. Weather and Climate Modification (Translated by Wang Mousheng et al.) [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 158-199, 200-244, 299-315, 316-344.
- Henderson T J, Wood J M, Nelson D. V. 1999. Preliminary, results from the use of hygroscopic flares for precipitation enhancement in Indonesia during the period 22 April-30 June 1998 [C]. Proceedings of the Seventh WMO Scientific Conference on Weather Modification, 1: 49-52.
- 侯团结, 胡朝霞, 雷恒池. 2011. 吉林一次降水层状云的结构和物理过程研究 [J]. 气象学报, 69 (3): 508-520.
- Hou Tuanjie, Hu Zhaoxia, Lei Hengchi. 2011. A study of the structure and microphysical processes of a precipitating stratiform cloud in Jilin [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 69 (3): 508-520.
- 胡朝霞, 雷恒池, 郭学良, 等. 2007. 降水性层状云系结构和降水过程的观测个例与模拟研究 [J]. 大气科学, 31 (3): 426-439.
- Hu Zhaoxia, Lei Hengchi, Guo Xueliang, et al. 2007. Studies of the structure of a stratiform cloud and the physical processes of

- precipitation formation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (3): 425–439.
- 黄美元, 雷恒池. 2008. 人工影响天气若干问题的讨论 [C] // 中国气象学会. 第十五届全国云降水与人工影响天气科学会议论文集, 5–8. Huang Meiyuan, Lei Hengchi. 2008. Discussions of weather modification [C] (in Chinese) // Chinese Meteorological Society. Collected Works for the 15th International Conference of Precipitation and Weather Modification, 5–8.
- 黄美元, 沈志来, 洪延超. 2003. 中国科学院大气物理研究所半个世纪以来的云雾、降水和人工影响天气的研究进展 [J]. 大气科学, 27 (4): 536–551. Huang Meiyuan, Shen Zhilai, Hong Yanchao. 2003. Advance of research on cloud and precipitation and weather modification in the latest half century [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 536–551.
- Koloskov B P, Manchuk Y V, Abbas A. 1999. Statistical estimation of cloud seeding operation in Syria (1991–1996) [C]. Proceedings of the Seventh WMO Scientific Conference on Weather Modification, 1: 161–164.
- Morrison A, Seams S, Manton M, et al. 2007. An overview of current cloud seeding research Australia and an analysis of the Tasmanian cloud seeding operations from 1964–2005 [C]. Proceedings of the Ninth WMO Scientific Conference on Weather Modification.
- Semsar Y, Pahlavanhasseing N. 2007. Rain enhancement projects carried out by the Islamic republic of Iran: Overview and results [C]. Proceedings of the Ninth WMO Scientific Conference on Weather Modification.
- Terbinche D E. 1999. Rainfall enhancement research and operation in South Africa: Past, present, and future [C]. Proceedings of the Seventh WMO Scientific Conference on Weather Modification, 1: 37–40.
- Warburton J A. 1999. The snowy precipitation enhancement project for the snowy mountains of Australia [C]. Proceedings of the Seventh WMO Scientific Conference on Weather Modification, 1: 191–94.
- William L, Woodley D, Rosenfeid W, et al. 1999. The Thailand cold-cloud seeding experiment 2 results of the statistical evaluation [C]. Proceedings of the Seventh WMO Scientific Conference on Weather Modification, 1: 25–29.
- 赵震, 雷恒池. 2008. 西北地区一次层状云降水云物理结构和云微物理过程的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 32 (2): 323–334.
- Zhao Zhen, Lei Hengchi. 2008. A numerical simulation of cloud physical structure and microphysical processes associated with stratiform precipitation in Northwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 323–234.
- 中国气象学会. 2008. 中国人工影响天气事业 50 周年纪念文集 [C]. 北京: 气象出版社, 1–135. Chinese Meteorological Society. 2008. Collected Works for Weather Modification in China in Recent 50 Years [C]. Beijing: China Meteorological Press, 1–135.