

人工影响天气——一位理论工作者的观点

Kenneth Young

(美国亚利桑那大学大气科学系)

摘要 人工影响天气早期取得的进展应归因于理论和试验之间健全的相互影响。然而在 70 年代却发生了方法上的分歧,形成了两个学派。一个称为“理论/试验学派”,以卡斯卡特计划为代表,着重于检验科学假说;另一个称为“观测/试验学派”,以科罗拉多河流域播云试验计划为代表,试图通过较细致的观测,增加对播云过程的认识。

理论/试验学派不久就几乎专门集中于自然云过程的研究,使人工影响天气领域几乎没有理论的成份。然而,理论成份对赋予人工影响天气以发展的活力是必不可少的。

文章谈到的关键问题包括:1)适于播撒云的识别;2)冰化性播云和吸湿性播云;3)最佳的关键性的播云参数,例如冰化性播云的播撒粒子浓度,吸湿性播云的播撒粒子尺度;4)防雹播云。

关键词 人工影响天气 播云 可播性 防雹

1 早年岁月

继发现干冰可将过冷却水云转变成冰晶云(Schaefer, 1946)和碘化银可用来将过冷却水滴转变成冰晶(Vonnegut, 1947)之后,人工影响天气领域曾享有过一个繁荣的时代。1947年初实施的卷云计划,用于冰播撒过冷却层状云获得重大成功,之后又用干冰播撒了积状云。这既促进了其它以研究导向的播云计划,同时也出现了众多的商业性“造雨者”。

Bergeron(1949)和 Ludlam(1955)在早期进行的理论研究工作表明,地形云适合于播撒催化以增加降水。1960年和1970年之间,两项地形云播撒试验,即克莱马克斯 I 和 II 试验(Climax I and II),在科罗拉多落矶山实施。虽然作为播云的结果,即是否增加了降雪的问题尚无定论,但克莱马克斯计划导致了播云计划中两个学派的分离。早于这两个计划,白顶计划得到负的播云结果就已促使芝加哥大学的研究小组转向自然云的研究。

2 两种不同的方法

克莱马克斯试验的一个关键结果是事后才发现的,即“播云效果”仅局限于云的“暖”区。这种效果可归因于较暖的温度下,云中有效自然冰核的相对缺少,而较冷云则可认为有高浓度的自然冰核。

这一发现强调了在了解云内物理过程及播云如何影响这些过程方面存在的弱点。追求“理论/试验”方法的学派,其想法是系统提出可检验的假说,其中包括简单数值模式的应用,以更好地了解这些过程,达到改进播云假说的最终目的(即在何时、何处播云,以及如何播云)。这个学派的工作可以卡斯卡特计划(Cascade Project)为代表,其详细情况已由 Hobbs 等人介绍过。

另一个学派的想法则是追求“观测/试验”的方法,试图通过改进观测方法,更好地了解播撒云内及其周围的物理过程。这个学派的工作可以科罗拉多河流域播云试验计划为代表,该计划并不严格地以克莱马克斯计

划的结果为依据。有关这个学派的某些重要结果,已由 Cooper 和 Marwitz 做过介绍。

到 80 年代,由于理论/试验学派变得更加醉心于了解自然云中的基本物理过程,而极少涉及到播云本身,因此两个学派的分歧进一步加剧。其结果是,这个学派更多地追求理论/观测方法,使播云领域没有重要的理论/试验成份。

上述意见并不意味着观测/试验学派不依靠数值模式,不去了解基本的物理过程。实际上,正是播云的兴趣,才在一定程度上推动了较大的(也可认为是更好的)云模式的产生。只是要指出,从 40 年代到 70 年代初理论和试验之间富有成效的相互影响,正是近期播云工作所缺乏的。自 70 年代后期以来,在播云领域内提出和检验假说的概念实际上已不存在,然而这是科学方法的决定性组成部分。

3 假说检验

科学的方法乃是基于理论和试验(或观测)之间的相互影响。理论可以启发试验(或观测);反之,试验(或观测)也可以启发理论。让我们回顾播云领域的早期岁月。1946 年, Schaefer 认识到干冰通过潮湿空气下落时可产生冰晶。他认为之所以如此,是因在同一云体积内,如果是水滴与冰晶的混合,则水滴将趋于蒸发,而冰晶则趋于增长。他提出假说:向一块过冷却水云投掷小的干冰块,云将被消散(由于形成的大冰晶将落出云外)。之后, Schaefer 检验了这个假设,发现它是正确的。正是这种理论和试验之间的相互影响,才造成了自 50 年代到 70 年代播云领域的“繁荣时代”。

几乎在同一时期, Vonnegut 做出推论:一种有着与冰的外延附生晶体结构相似的物质,可作为一种很好的成冰核剂。他发现,碘化银在晶格参数上与冰非常接近。之后,他在试验室进行试验,发现 AgI 可在比云中通常形成冰晶要暖得多的温度下,产生大量冰晶。基于这一发现他提出假说:AgI 是一种很好

的播云剂。当然自那时以来,这一假说已被广泛地进行了检验。现在, AgI 已成为经常被选用的播云剂。

1949 年, Bergeron 提出假说:地形云是播云的最好选择对象。1955 年, Ludlam 用一个简单的数值模式扩展了这个假说。到 60 年代,这个假说通过克莱马克斯计划进行了外场检验。

也是在 40 年代, Kraus 和 Squires (1947) 首先观测到播云造成云的加速发展,这导致提出一种假说:使用大剂量的干冰或 AgI 进行播撒,可造成对流云低层的冰化,由此这种较早释放的潜热,将为上升气流的发展提供附加的浮力。这个假说作为狂飚计划 (Project Stormfury) 的一部分进行了检验,并得到证实。

4 播云现状

以上的简述业已提到,理论和试验的相互促进全都出现在播云的早期岁月里。那是一个快速进展、影响巨大和有着很多新思想的时期。然而自那时以来,播云领域发生了什么变化呢?现行的播云假说仍然与 50 年代极其相似(引入播云剂 A 到云 B 得到期望的结果 C)。虽然在播云的细节上有某些变化,但本质上的变化却非常小。换言之,播云领域处于停顿状态,充其量只在播云的规模上有所增长。

这是为什么呢?也许是由于播云主要支持者普遍存在的一种看法,即认为播云是一门试验科学,理论仅有非常次要的作用。由此,基于理论上考虑的一些建议——包括数值模拟——都被大大地忽视了。即使考虑新假说的尝试都非常少,更不用说在外场对他们进行检验了。

真实情况是,云是极其复杂的,包括动力过程与微物理过程之间的相互作用,以及每一种过程自身都很复杂。还有一种真实情况,即太多地听到关于自然云如何运转的议论,然而理论同试验/观测之间的相互影响对于

播云的进展却是决定性的因素。例如 Rangno 和 Hobbs(1991)对极地海洋性云中成冰过程的解释是:在一个个例中是由于接触冻结的成核作用,而在另一个个例中则是凝结冻结的成核作用。这两种成冰方式在实验室中都观测到了,并通过理论考查了在什么条件下哪一类成冰方式起作用。Rangno 和 Hobbs 提出的这种关于冰晶成核作用方式的假说,乃是通过他们的观测对播云假设做了本质上的改进。

令人遗憾的是,这种理论同观测协调一致的情况,在现行的人工影响天气领域中是太缺乏了。在希望播云成为一项业务性的技术之前,有许多基本问题必须做出回答。在文献中,已列出了很多这类问题的理论答案(假说),下一步是要在实际云中对较有希望的假说进行检验。

5 若干基本问题

以下的一系列问题虽不意味着已包罗全部,但对需解决的问题是有指示性的。将考虑两种类型的人工影响天气活动,即播云增水和播云防雹。

5.1 增水的可播性

有些云不需要你对它们施加任何影响也会下雨,而另外有些云不管你对它们施何种影响也不会下雨。处于这两种情况之间的一些云则可对其进行人工影响。这个关于“可播性”的问题是一个基本问题,对那种降水过程不能人为改变的云进行播撒(催化)是不会有效果的。

控制可播性的关键参数是什么呢?这些参数的何种取值范围决定了可播撒的云群呢?这些基本问题很少被谈到过。从克莱马克斯 I 期试验得到的结果表明,仅当 500hPa 温度暖于 -21°C 时,才能通过播撒增加地形云的降水(Grant, 1986)。Hill(1980)根据飞机结冰作为云顶温度和上升气流速度的函数关系,确定了地形云的可播性。

Hudak 和 Lisk(1988)按气团类型对南

非的积云分类,发现仅仅是那些云顶温度暖于 -20°C 、处于海洋性热带气团内的云才是可播撒的;估计出降水效率的可能增长潜力由 2% 到 15%。他们指出,大陆性的热带云中拥有大浓度的冰粒子,而海洋性的极地云则顶温冷于 -15°C ,存在有效的自然撞冻过程。他们发现顶温暖于 -15°C 的海洋性极地云其生命期对产生降水又太短。

这些问题 Rokicki 和 Young(1978)做了理论上的研究,认为云底温度、上升气流速度和云凝结核活化谱是控制云中降水发展的关键参数。

Rokicki 和 Young 用一个具有全微物理、包括相当复杂的(第三代)成冰机制的气块模式,根据云体产生 20dBZ“初始回波”所需时间的减少值,确定云的可播性。他们认为,可播撒的云是那些对于自然形成降水来说生命期太短,或通过云体的渡越时间太短的云。初始回波出现时间减少值较多的云较可能通过播撒产生降水或增加降水。使用多普勒雷达测量云的垂直速度和云的厚度,可确定通过云的移动时间,再与这个简单的模式结合,可非常快地地区分出可播撒的云和不可播撒的云。

Young(1993)归纳了用 AgI 播云的结果,如图 1 所示。值得注意的是,克莱马克斯计划的可播性定在云底温度 -5°C 、上升气流速度达到 2m/s 的区间内。由此表明,在克莱马克斯计划中,云的可播性随云的温度降低而减小。这个结果是事后分析中才发现的(虽然 Hobbs 和 Rangno 对此发现提出质疑)。

云底温度和上升气流速度在相当大的程度上确定了云中过冷水的可利用性。云的液态水作为可播性指标的重要性是由 Super 和 Holroyd(1989)认识到的。另外, Likewise 等人(1994)用一个三维、时变、嵌套网格模式对亚利桑那中部复杂地势上空的气流进行模拟,发现云的液态水与地形密切相关。山地上空由气流激发的重力波为云提供了最大浓度的液态水。

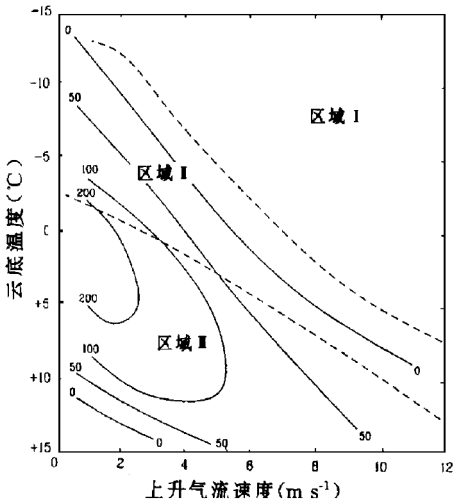


图 1 作为云底温度和上升气流速度函数的可播性等值线. 即在最适宜于 AgI 播云的上升气流条件下, 同自然云相比较, 产生 20dBZ 雷达初始回波时间减少值的等时线 (用秒表示). 区域 I: 无论自然或播云条件下均无降水; 区域 II: 有很大的过量播撒风险 (最佳播撒率 $< 20\text{g}/\text{km}^2 \cdot \text{min}$); 区域 III: 推荐播云区域

5.2 冰化性播云的最佳冰晶浓度

如果一块过冷云只用非常少的冰晶播撒, 则增加的冰晶一般将长得很大, 足以在对云体无明显影响情况下落出云外, 但它们将产生非常小的降水. 然而, 如果用太多的冰晶播撒, 则在冰晶耗尽云中可利用的过冷液态水 (和过分的水汽) 之前, 没有任何冰晶可长大到足以成为降水到达地面, 因此将不会产生降水, 或只有少量降水. 两者之间有一最佳的冰晶浓度, 可最大限度地增加到达地面的降水量.

什么样的冰晶浓度将期望有最佳的增水效果呢? Rokicki 和 Young 提供了作为云底温度和上升气流速度函数的 AgI 的最佳播撒率 ($\text{g} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$). 他们发现, 较冷的云和较强的上升气流速度将有较低的最佳播撒率. 基于此, 他们把云分成三类: 1) 在自然或 AgI 播撒条件下都没有降水的云; 2) 易于

造成 AgI 过量播撒的云; 3) 难于出现 AgI 过量播撒的云 (见图 1). 显然, 对 I 类云不必费心去播撒; 对 II 类云应细心操作避免过量, 对 III 类云应集中进行播撒 (同样碰到所需的渡越时间问题).

在一块实际云中达到最佳冰晶浓度显然涉及到播云剂的充分散布. 虽然不可能期望在整个云内播云剂有完全均一的浓度, 但有可能最大限度地使播云剂浓度接近最佳值的那部分云体积最大, 这可通过使播撒体积内播云剂的平均浓度接近最佳值来实现.

5.3 吸湿性播云的最佳种滴尺度

播云以促进碰并过程是靠将种滴引入云中. 这些种滴既可是“纯”水滴, 也可是“盐”溶液滴. 盐滴是用吸湿性药剂, 如氯化钠或尿素播云时形成的. 如在云底播撒, 要求种滴小到足以靠适合的上升气流抬升入云. 如在云顶播撒, 则要求种滴大到足以穿过云顶附近的上升气流下落. 显然, 云底播撒有更高的成本效益, 因为对给定量的播撒物质而言, 它可以获得更多数量的种滴; 同时, 播云飞机到达云底也比到达云顶更容易.

理想的情况是: 种滴在上升气流中升高时增长, 当几乎到达云顶时其下落速度正好等于上升气流速度. 之后, 当它们向云底降落时继续增长 (和破碎). 这种情况可期望产生云水向雨水的最大转换. 因此, 最佳种滴尺度是上升气流速度和云厚度 (当然还有播云方式) 的函数. 一个一维、时变、全水模式将有能力在这些参数合理取值范围内考察降水的发展. 然而这项工作尚未进行.

这个问题的一部分已由 Rokicki 和 Young 处理. 使用他们的气块模式, 他们在水量播撒率固定、仅改变种滴尺度和相应浓度条件下, 考察产生雷达初始回波所需的时间. 他们发现, 较大的种滴尺度, 产生初始回波所需时间的减少就较多. 显然, 种滴尺度也不能无限制地增大, 它要受到上面论述过的各种因素的制约. 这意味着有一个最佳的种滴尺度.

Rokicki 和 Young 估计了沉降的影响并得出结论:对于 3m s^{-1} 的上升气流和 15°C 的云底温度,最佳种滴尺度大约是半径 $40\mu\text{m}$ 。更近期由 Tzviaon 等人(1994)完成的一项研究同样表明,最佳尺度接近半径 $40\mu\text{m}$ (其干盐粒子半径为 $16\mu\text{m}$)。有兴趣的是 Rokicki 和 Young 的研究表明,将种滴尺度从 $30\mu\text{m}$ 改变到 $40\mu\text{m}$,尽管水量播撒率增大了 1000 倍,但却只有相同的效果!这些结果表明,吸湿性播云的关键是细心选择种滴大小。如果播撒种滴的尺度范围太大,就意味着大部分的播云物质都浪费掉了。这是由于仅有很少一部分的播云物质产生了接近最佳尺度的种滴,而且也只是这部分种滴能对降水的发展产生决定性影响。这就解释了为什么许多吸湿性的播云计划会得到极其不同的结果。

Cooper 等人(1996)用一个气块模式将这个概念扩展到半径 $<10\mu\text{m}$ 的干粒子,也取得同上面相似的结果。他们赞成种粒子尺度明显小于过去提出的最佳尺度。由此,将大大减少播云物质所需的总量,而这种吸湿性种粒子很容易通过焰弹产生。这个结果是基于 Johnson(1982)数值研究的外延得出的。

Tzviaon 等人(1994)进行的有限研究,是确定可播撒云及最佳播云参数的一个很好范例。他们使用一个交互式动力框架中具有全液态微物理过程的轴对称模式,用以确定两块不同云的最佳种粒子尺度,以及播云的时间、位置和持续时间长短。

5.4 冰化性播云与吸湿性播云

很少谈到的一个问题是,到底是用 AgI 播云以促进冰晶过程更好,还是用某种吸湿性物质播云以促进碰并过程更好。传统的“观念”认为,播云方式应与占优势的自然机制相配合(即冷云用 AgI 播撒,暖云用吸湿性物质播撒)。这种观念真的正确吗?

图2是 Rokicki 和 Young 对自然云、AgI 播撒、大滴播撒三种情况下,在云底温度为 $+5^\circ\text{C}$ 、上升气流速度变化时进行比较的结果。Rokicki 和 Young 指出,当上升气流速度

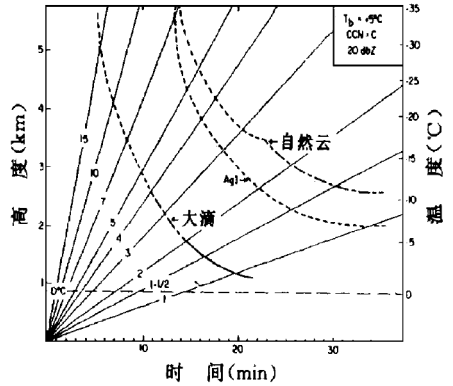


图2 云底温度为 -5°C 时,自然云、AgI 播撒和大滴播撒情况下达到 20dBZ 初始回波所需时间。AgI 播撒率接近最佳值;大滴播撒率是 $100\text{gkm}^{-2}\text{min}^{-1}$,上升气流速度 (ms^{-1})用斜向右上方的直线表示。粗实线表示初始回波出现时, $>100\mu\text{m}$ 半径的粒子中, 90% 以上是水滴;虚线表示 90% 以上粒子是冰粒;点划线表示中间状态(水滴和冰粒共存)

$>2.5\text{ms}^{-1}$ 时,自然降水过程是通过冰晶启动的;反之对较弱的上升气流,则两种过程都起作用。然而对所有上升气流速度而言,大滴播撒要比 AgI 播撒更快地产生降水粒子。

这个发现同 Dennis 和 Koscielski(1972)的外场试验结果是一致的。他们发现,在 AgI 播撒的云中,平均初始回波高度在云底以上 2100m ;反之在盐播撒的云中,平均初始回波高度在云底以上 1600m 。然而在非播撒的云中,平均初始回波高度在云底以上 3350m ,即盐播撒时较之降低了 1750m 。

这些结果表明,对大多数云而言,都可选择吸湿性物质作播云剂,这同播云作业的现行状况截然相反!同样还应指出,使用吸湿性物质极少可能出现过量。一般来说,你使用的吸湿性物质愈多,你得到的降水也愈多。当然,最后回报率减少的规律会起作用。

Klimowski 等人(1996)报告了一项吸湿性播云试验的初步结果。这项试验系作为 1995 年亚利桑那计划的一部分,计划设计的

目的是从“冷”云中增加降水。

5.5 雹胚选择及其对防雹的意义

几乎司空见惯,冰雹及其防御仅仅作为降水及其增水的附属部分加以考虑的。这种不正确的观点包含在参考文献报告的从全云模式得出的许多结论之中。经全面审视,基本问题如下所述。

- 对于一个由雹胚产生雹块的雹暴,观测告诉我们,雹浓度的典型值大约是 1000m^{-3} 到 10000m^{-3} 。相似地,根据雹块在地面的累积速率可外推出冰雹生长带内的雹块浓度,由此得到雹块浓度大约是 0.1m^{-3} 到 1m^{-3} 。因此,在 10^4 — 10^6 个可能成为冰雹的胚胎中,实际上仅有1个变成了冰雹。是什么过程决定了什么样的雹变成冰雹呢?

这个问题的答案对“有益竞争”(beneficial competition)防雹假说的生命力具有决定性意义。

1) 随机选择机制与决定论选择机制

Young(1978)讨论了这个问题。他使用一个二维运动学蒙特卡罗模式,模拟雹通过倾斜上升气流时扰动对其生长的影响。他得出结论,随机要素对什么样的雹胚经筛选变成冰雹有着强有力的影响。这一影响同雹的初始尺度和初始位置的影响(较大的尺度和较低的位置较为有利)是大致相当的。

选取5种初始雹胚尺度(范围从0.024cm到0.032cm)和4种引入高度(范围从模式基面以上0—45m到135—180m)进行了研究,Young发现尺度和引入位置的每一种组合都对雹块群体有贡献,但是,20种组合中仅有4种组合中的50%以上的粒子变成冰雹(其最高比例为72%)。

2) 雹块尺度分选

Young将雹块的平均尺度作为距引入点距离的函数进行考察后发现,最大的冰雹从模式中落出的典型位置较之较小的冰雹更接近于引入点。他把此称为“反尺度效应”(即尺度同距离或时间呈反相关)。然而他指出,

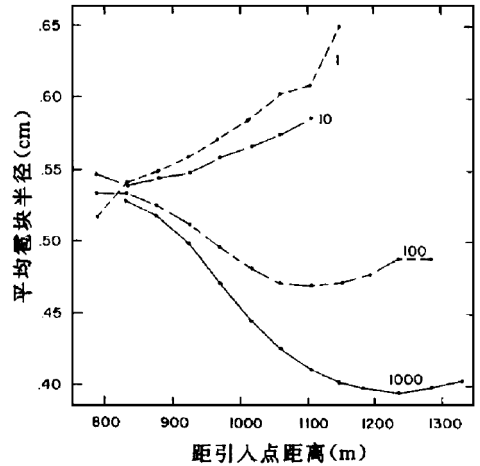


图3 平均雹块半径与距引入点距离的函数关系。取总的胚浓度为1、10、100和 1000m^{-3} 。仅用了初始半径为0.025cm的雹胚

反尺度效应在高雹胚浓度时最显著;随着胚浓度减少,这种效应就变得不那么显著了;最后当浓度 $<10\text{m}^{-3}$ 时,尺度同距离之间就变成正相关了(见图3)。

有益竞争防雹假说假定,雹块平均尺度的减小能够通过增加雹胚生长区中潜在雹胚的浓度实现。又假定潜在的雹胚平等地争食固定量的过冷水,以致它们的增长通过竞争而受到制约。因此,实现有益竞争假说就类似于在图3中把较低的胚浓度移向较高的胚浓度。但从图3上可明显看出,一旦胚浓度超过 10m^{-3} ,则最大雹块尺度将保持常定。

这个有趣结果的出现,是因为在反尺度效应下,最大的雹块沿着最低的轨道。仅有一定数目的粒子被(随机地)筛选变成冰雹。虽然沿着较高轨道的粒子其可供增长的时间延长了,但仍无法补偿因在最低轨道以上过冷水含量随高度减少的不利影响。因此,沿着较高轨道的粒子不可能长得很大。这就是通过播撒增加雹胚产生的结果。由于雹块争食过冷水的不均等性,因而对大多数雹暴而言,有益竞争假说是无效的。

3) 降低冰雹生长轨道的防雹假说

基于上述结果,Young(1978)建议:使用

较大的粒子在雹胚形成区上升气流的下部播撒,将减少所有尺度效应条件下产生的冰雹尺度。这些较大的粒子可通过吸湿性播撒形成(见 5.4 节)。播撒粒子将穿过冰雹生长带(HGZ)下方的主上升气流,那里由于温度相当暖不能使大量的撞积液水冻结,粒子将变成海绵状冰雹下落,从而只造成较轻的灾害。同时,这些粒子将清除本来会进入冰雹生长区的过冷水,从而使冰雹生长区产生的冰雹尺度减小。

4) 数目竞争对冰雹生长的影响

Young(1978)同样考察了数目竞争对冰雹生长的影响。他发现,对大于 360000 个粒子的粒子群(相应浓度为 100m^{-3}),数目竞争可减少最大冰雹的尺度。他的结论是,许多云模式超出了这个限度,因而从这些模式得到的结果不能以可靠的方式应用于冰雹实际增长。必需指出,这些模式所指出的有益竞争假说在实际上是无效的。因为它们“强迫”雹胚粒子完全平等地争食过冷水,而实际上争食是不完全平等的。

5.6 防雹的可播性

是什么原因使一个雷暴产生了大量冰雹,同时另一个外观与其相似的雷暴却未降雹?如果我们能回答这个问题,则防雹作业可更好地集中于那些降雹的雷暴,从而大大减少费用消耗。这当然是一个同增加降水有着相似概念的可播性问题,仅在答案上有许多差异。

Young(1993)论证了对给定的上升气流(同时给定最大上升气流速度),产生冰雹的两个主要因素是主上升气流的宽度和倾角。上升气流的倾角和宽度综合地决定了快速增长雹块将如何通过主上升气流。如果增长中的雹胚粒子通过上升气流时移动得太快,则由于它们经历的上升气流速度的增加要比因粒子增长造成的降落速度增加要快,因此增长的粒子将不断升高。如果它们在通过上升气流核心之前升高到 -40°C 层以上(同质冻结高度),则它们将大概不能变成冰雹下落。

如果增长的粒子通过主上升气流时移动得太慢,则它们的降落速度将比它们经历的上升气流速度增加得快,因而它们所处的高度将不断降低。在它们长大到雹块尺度之前,就可能落入上升气流区。所以,冰雹生长最适宜的轨道是一条通过上升气流核心的非常接近水平的轨道。这一必要条件已由 Foote(1984)的观测所证实。

图 4 表示了上升气流的宽度和倾角变化如何影响雹块的最大尺度和平均尺度。Young(1993)还指出,改变上升气流的宽度和倾角同样会改变单位面积上的总冰雹质量。

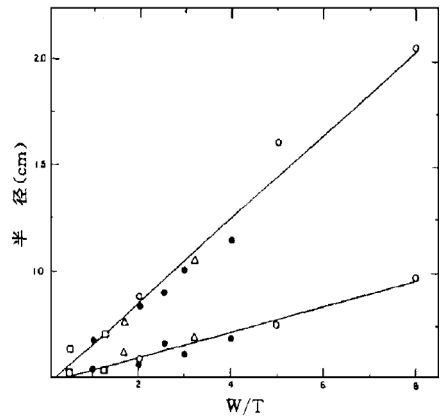


图 4 根据蒙特卡罗模式模拟冰雹生长得出的最大雹块半径(上面一条线)和平均雹块半径(下面一条线)同上升气流宽度与倾角比之间的函数关系。在所有个例中,最大上升气流速度均为 25ms^{-1} 。直线代表点的最小二次方拟合线。○表示倾角 $T=0.2$; ·表示 $T=0.4$; △表示 $T=0.5$; ▽表示 $T=0.6$; □表示 $T=0.8$ 。

6 全云模式和云过程模式

全云模式和云过程模式代表了云模式系列中的两种极端情况。全云模式试图模拟云中 and 云附近所有有关的动力过程和微物理过程。全云模式可以 Clark-Hall 模式为代表,最近被 Brintjes 等人(1994)用于考察亚利桑

那冬季地形云的可播性。这种模式能够模拟动力过程和微物理过程之间的相互作用,并结合对重要的微物理过程作相当细致地处理。由于过去25年来计算机运算能力的增长,已可对这些模式的复杂性加以考虑,虽然仍有许多微物理过程的细节必须简化。

作为另一种极端情况,云过程模式将其注意力集中在少数关键过程上,力争尽可能精确地模拟这些过程。通常,云过程模式只编入了非常简化的动力过程,倾向于采用“气块”或“一维”之类的模式。前一节已介绍了有代表性的云过程模式的数值模拟结果。

这两种类型的模式有非常不同的目的。全云模式试图模拟实际的云(自然的或播撒的),并且大部分的这类模式,是以直接同实际云进行比较为目的。全云模式需要广泛的计算资源,只能对相当少数的个例运算处理。

云过程模式用于洞察几个关键过程之间的相互作用并优化播云参数。后一个目的常常需要进行许许多多的模式运算。例如,由Rokicki和Young报告的研究工作,就需要几百个模式运算。由于可利用的计算能力有限,如果模式太复杂,则将无法在实际中应用。

由于过去25年来可利用的计算机能力的稳步增长,融合两种模式的方法已成为可能。现在已有可能利用全云模式去更加严格地检验播云假说,而对播云假说的检验乃是近20年以前利用云过程模式推动的结果。

7 用全云模式作“假说检验”

过去20年进行了好几个外场计划,这些计划包含了在实施播云之后对各种重要过程的细致考察。这类计划中最著名的也许是高原试验(HIPLEX),它是1979年和1980年夏季在蒙大拿州东南部进行的。主要目的是考证对小块的、孤立的浓积云实施静力播撒的物理假说中几个重要的环节。关于这项试验的设计,Smith等人(1984)已做过介绍,有关结果Cooper和Lawson(1984)做过简述。

从本质上讲,物理假说是“将播云剂A加入到云B得到结果C”这一假说的精心设计。在HIPLEX试验中,播云后接连发生的重要环节是:1)用干冰播云后将增加冰晶浓度;2)继之将增加淞附冰粒子的浓度;3)继之将增加降水粒子的浓度;4)继之将增加地面降水量。试验中对播撒云和自然云(未播撒云)进行了对比。根据Cooper和Lawson的介绍,前两个环节已得到证实,而对后两个环节而言,播撒云和自然云之间并未得出具有统计显著性的差异。由于这一结果的出现,使播云之后的重要环节变得更加复杂了。要解开这些环节,就需要用全云模式去进行评估。就这一点而言,“假说检验”就变成了“数值模式证实”。最近由Bruitjes等人(1995)写的一篇文章,对山区实际观测的示踪烟羽同模拟的示踪烟羽进行了比较,这是模式证实的一个极好例子。

这是一项重要的工作,它需要去做。但是它是真实的假说检验吗?

8 总结和结论

人工影响天气早期的进展乃是由于理论同试验/观测之间有着健全的相互影响。实际上,所有科学领域的进展都依赖于这种相互影响。从Schaefer和Vonnegut的假说检验试验到诸如狂飚、卡斯卡特、克莱马克斯等计划的假说检验正是此种相互影响的有力证据。

在过去的20年间,这种相互影响在人工影响天气领域中大部分已不复存在。事实上,这几乎成了同理论结果和理论家的对抗。数值模式常常被看作过份简单化而不予重视。在过去15年中人工影响天气缺乏进展,至少部分应归因于这种占优势的不正确观点。

是什么原因造成人工影响天气进展方向的改变呢?这种变化可追溯到70年代,当时理论/试验学派(例如卡斯卡特计划)同观测/试验学派(例如科罗拉多河流域播云试验计划)之间发生了分离。指出这两个不同学派工作

的经费资助来源是有意思的。卡斯卡特计划主要由科学导向性的政府机构——联邦科学基金会(NSF)资助,科罗拉多河流域播云试验计划则主要由工程导向性机构——农垦局资助。

这并非是指农垦局没有科学研究工作,实际上他们在这方面做了许多有益的工作。然而这种机构的政治现实性使得他们必须遵循工程路线。工程师的业务不是去产生科学假说,而是对科学知识的应用。这表现在70年代初期,相当多的人工影响天气作业都是应用“将物质 A 引入云 B 得到结果 C”的播云方式。

如果理论/试验学派能保持对播云领域的积极兴趣,也许播云假说的产生和检验将继续下去,而观测/试验学派也能将这些结果结合进他们的播云中。然而理论/试验学派很快就认识为,实际上我们对自然云中的降水过程还缺乏清楚的了解,更不必说加上播云剂效果的复杂问题了。他们采取了进行科学上正确的态度,即在试图了解播云效果之前,更充分地了解他们将进行干预的物理系统。

遗憾的是,这种认识使人工影响天气领域很少有理论成分的工作。观测/试验学派并不倾向于去证实未经检验过的假说;归根结底,他们自认为已经有了一个工作的假说!理论/试验学派更感兴趣的是了解自然云,而并不准备对播云假说进行检验。

Changnon 和 Lambright 阐述了造成人工影响天气学派间分离,导致现在的人工影响天气领域缺少理论/试验成分的政治背景。他们指出,“发展更可靠技术的人工影响天气研究遭到失败”的主要原因是“大气科学团体在联邦领导关系的赞助下,常常使用‘黑箱’型的试验去试图解决复杂的大气科学问题”。

Changnon 和 Lambright 指出,联邦科学基金会的领导机构作用,是1958年国会颁布的,继后,又将联邦对人工影响天气研究的投资从1963财政年度的270万美元增加到

1972财政年度的1870万美元。农垦局以及现在的国家海洋大气管理局都为人工影响天气做了大量的实际工作。然而,1968年国会撤消了联邦科学基金会对人工影响天气的领导作用。1971年,国家科学基金会的领导人将人工影响天气转变成应用研究及应用于国家需要的技术方向的研究(RANN)的指导性研究。Changnon 和 Lambright 称这是“一个成问题的决定”。继此之后,在联邦科学基金会内部对人工影响天气的兴趣大大降低,提供的经费资助也迅速减少。

Changnon 和 Lambright 还得出结论,人工影响天气从研究和发展阶段转移得太快。他们指出:“农垦局及其在60年代实施的‘天空水’计划的主题”是“大气管理”,他们的假定是已有足够的科学知识使人工影响天气开始投入应用。人工影响天气现在所处的停顿状态是对 Changnon 和 Lambright 结论的支持。

人工影响天气真正的进展只有当理论同试验/观测之间健全的相互影响得以恢复时才会出现。应该从像国家科学基金会这样的科学导向性机构取得人工影响天气的经费资助。资金特别需要分配用于人工影响天气/播云假说的检验。观测/试验学派需要理解和支持这一努力,而不可将它看作是争取经费的竞争对手。

正如本文已指出的,在文献中已经有大量可供检验的假说。所提出的那些有决定意义的问题,必须在人工影响天气成为一项可行的技术之前得到回答。理论/试验方法在人工影响天气领域得到恢复是不可缺少的。最后引用国会议员 Rhodes (1982)的一段话:“人工影响天气的潜在社会效益是如此巨大,使我们不容忽视,也不能以零碎的方式去追求。我们需要一种更好的国家战略意识。”

高子毅译自 *Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 77, November 1996*

张建新校