

人工降水的试验设计和效果检验

叶 家 东

一、前 言

人工降水的试验设计和效果检验是一项重要和复杂的科学研究工作。长期以来,在人工降水的科学试验中,围绕着试验设计和效果检验,有过许多争论。可以说,人工降水科学试验的水平,在某种意义上讲,是取决于效果检验的可信程度。在我国,自从1958年广泛开展人工降水试验以来,在试验设计和效果检验方面做了不少工作,但总的说来,试验设计和效果检验至今还是一个薄弱环节,需要认真研究,逐步解决。本文主要讨论人工降水的试验设计、效果检验以及资料分析方法方面的有关问题。

一、试验设计

试验设计指的是一个详细的研究计划,包括如何收集资料、分析资料,使得予订的设计能恰当地加以检验和证实,从而作出推断。从国内外现有的效果检验有关的设计方案看,大体上可以分成如下几种:

1. 序列试验:

采用单个试验区,一般用月雨量等气候量作为统计变量,利用历史平均值作为试验期自然雨量的估计值。这种方案检验效果的功效是很低的,要在可接受的显著性水平(例如 $\alpha = 0.05$)下检验出试验效果来,则效果必须超过一倍以上,而人工降水增加月雨量,常常达不到这么大的程度。只有试验许多年,才有可能较确切地检验出相应的效果。这种方案很少采用,我国只有在防雷试验中才用它。

2. 上风方、下风方的对比试验:

以作业点(或作业线)的下风方为目标区,上风方相应的区域为对比区,假定两区自然雨量相等,以试验期上风方的雨量作为目标区的自然降水量估计值,再和实测雨量比较确定效果。这种设计方案只对平原地区层状云降水较为有用,对于地形复杂的地区或积状云降水不宜采用。因为两区自然雨量相等的假定缺乏依据。一般总是选降水条件比较有利的下风方作为试验单元进行作业,而上风方是否有利则不去管它,上风方有利而下风方不利的情况一般是不会去作业的。为了使这种方案的依据比较客观,必须找一些对比单元。例如,在侧风方相应地选一个对比上风方和对比下风方,看看它们之间的雨量是否相等,如果不等,就应采用比率分析法或回归分析法进行检验。

3. 区域回归试验:

这是我国目前用得较多的一种试验设计方案,国外一些抗旱的作业性试验,至今仍采用这种方法。这种试验需要选择一个(或几个)和目标区的天气条件、地理条件相似,区域雨量密切相关的对比区,对比区的雨量不受作业的影响。根据两区的历史雨量资料,建立区域雨量历史回归方程,然后将试验期对比区的雨量代入回归方程,即可求出试验期目标区的自然降水量的估计值(期待值),再和实测雨量比较以确定效果。这种试验方案实际上是把对比区雨量作为预报因子来用的,如果对比区选择得当,可用的历史资料较长,分析功效还是比较高的。例如福建古田县1974年8月份,用高炮发射AgI(碘化银)试验一年,获得增加月雨量24.7%,显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的结果。在结合抗旱开展的作业性试验中,回归试验仍是一种可

行的办法,需要充分挖掘潜力,以提高分析结果的客观性和准确性。

历史回归试验的依据是气候相似,如果大气环流形势有长期的系统性变化,这种依据就不充分,这个问题当历史资料较短时尤为突出。历史回归分析不能预测历史上所未曾经历过的现象。

正因为区域回归分析是根据历史气候相似性原则建立起来的,它所用的统计变量一般都是气候量,如季雨量或月雨量。但这样取的结果,势必会冲淡试验效果以致一时鉴别不出来。能否根据天气相似的原则来建立历史回归方程呢?湖南凤凰县的试验对比作了尝试。取统计变量为区域面积平均日雨量、选取历史相似天气的判据有两个:天气形势相似和对比区雨量相似,据此找出历史上和试验日相似的天气日,建立历史相似天气日雨量的区域回归方程,再由试验日对比区日雨量代入回归方程求出试验日目标区自然日雨量的期待值,和实测雨量比较确定效果。如果相似天气的判据选择得更恰当,区域日雨量的相关性有所改善的话,这种根据天气相似原理建立起来的回归分析方法的功效会有所提高。

4. 随机试验:

鉴于回归试验存在一些固有的问题,从50年代后期开始,国外大多数研究性试验设计都采用随机方案。其基本思想是将宜于催化的云(或日子,或降水过程)随机地分成二组,一组播云,一组不播云留作对比,如果在这两组机会中雨量出现显著的差异,就可以归因于作业,如果只用目标区本身的资料,则这种试验叫做单区随机试验。

随机试验的优点是在较大程度上避免了主观推测,如果试验对象能限制在物理过程比较单一的范畴之内(例如层状云降水或积状云降水,冷云降水或暖云降水),则在二组机会中把与人工影响无关的因子作为随机因子就有了依据。只是在这种前提下,随机试验的结果才真正符合随机抽样的原则,统计检验的方法才能在它本来的含义下恰当地加以运用。

单个目标区的随机试验功效太低,难以在较短试验期内检验出一定的效果,所以常常附以一些控制变量,以提高其功效,常用的有下面几种:

(1) 区域回归随机试验:福建古田县的试验就采用这种设计方案。在目标区附近选一对比区,目标区的试验单元按随机规则决定是否播云,对比区一直不播云,也不受目标区播云作业的影响。因为目标区是否作业是根据随机规则确定的,所以可以假定作业单元目标区和对比区的自然降水量的区域相关关系是和对比单元一样的。于是可采用和历史回归分析相仿的程序,根据由对比单元目标区自然降水量的期待值,进而和实测雨量比较确定效果。由于这里利用了对比区雨量作为控制变量(协变量),作业单元目标区的自

然降水量的估计值就比较准确,从而可以提高试验的检验功效。古田县用小火箭发射冷云催化剂播云的方法试验二年,62个单元,就得出三小时区域面积平均增雨量40—78.6%的结论,统计显著性水平达到0.005以上。

(2) 随机交叉试验:选择两个雨量相关性好而彼此又不污染的试验区,每个试验单元都按随机规则决定在其中一区作业,另一区对比,然后比较作业日雨量和非作业日雨量以评定效果。由于每一个试验单元都在某一区进行了作业,可望试验功效会有所提高。Moran假定 n 是单区随机试验为在一定的显著性水平检验出一定的效果所需要的试验单元数目,则在一定的假定条件下,区域回归随机试验所需要的试验单元数目为 $n \frac{(1-r)}{(1+r)}$,随机交叉试验相应的试验单元数

日为 $n \frac{1-r}{2}$,这里 r 是二个试验区的雨量相关系数。

徐尔灏也曾独立地试验过,指出随机交叉试验的功效比单区随机试验高。以色列人工降雨试验采用随机交叉试验方案,试验7年,得出日雨量的平均增量为15.3%(全区)和21.8%(内地)的结论,显著性水平分别达到0.009和0.002。如果把催化剂对对比区的污染因素除去,则相应的增雨量是22%和31%。

上述随机试验的设计方案中一个难以完全避免的问题是催化的污染问题,有二种污染,区域之间的污染和试验单元之间的污染,后者叫做“持续性效应”,有证据表明,播云后数天内冰核数仍维持相当高。

(3) 对云块的随机试验:统计变量是一块云或一群云的降水量,而不是区域雨量,这要用经过仔细校准的雷达进行观测。这种试验针对具体的云进行比较,针对性较强,分析功效也较高。美国佛罗里达州的积云动力催化试验就采用这种设计方案,选择一对够试验条件的云(或一块云)随机地决定其中一块作业,另一块留作对比。可用比率分析法比较这两组云的降水量以确定效果。比较好的分析方法是利用播云前一段时间内云的自然降水量作为控制变量,再利用和区域回归试验相类似的方法分析效果,这种分析方法功效较高。

随机试验要放弃一半左右的播云机会,这与抗旱斗争的要求是相矛盾的,所以一般在作业性试验中都不大采用它。但搞试验应该点面结合,在一些地区搞个把试验基地,侧重于研究性的试验,利用较客观的方法来检定某种播云技术和方法是否有效以及在什么条件下有效,是很必要的,只有通过比较细致的研究性试验,才能不断提高人工降水的科学水平和实验效果。

三、效果检验和分析方法

1. 效果的统计检验

统计检验的主要内容是显著性检验,即如果实测雨量和估计雨量之间有差异的话,就要对这个差值进行统计检验,指出由于降水的自然变差引起这么大差异的可能性有多大。如果这个可能性很大,我们就没有理由认为人工影响显著地改变了雨量,即所谓效果不显著;如果这个可能性很小,例如小于5%,我们就有较大的把握说人工影响有效,即所谓效果显著,上述可能性的大小通常就叫做显著性水平,用 α 表示。

显著性检验在数理统计中常叫假设检验,可分为参量性检验和非参量性检验。在人工降水试验中应用较多的参量性检验法是t-检验法。t-检验要求统计变量服从正态分布,且要求人工影响的措施只改变总体平均值,不改变总体方差,也就是说人工影响前后的二个样本方差不应该有显著的差异。这两个条件不满足,t-检验的依据就不成立。因此,在决定用t-检验法以前,要对统计变量的分布进行分布函数检验,常用的方法有 χ^2 -检验和柯尔莫哥洛夫拟合度检验法。这些检验法都要求大样本,一般样本容量应大于50和30。如果检验的结果与正态分布偏离较大(例如拟合度小于50%)就应该设法使变量正态化,通常用变数变换的方法,例如取雨量的对数,方根、立方根或四次方根比对数拟合得更好。国外一般认为雨量是服从 Γ -分布的,但考虑到用等概率变换法将 Γ -分布正态化,手续较繁,所以一般宁愿采用简单变换的方法。如果拟合度还可以接受的话,取对数的变换方法是比较好的,因为它将雨量的比值变换成对数的差值。考虑到近年来关于非零降水量作业单元的人工影响的效果,倾向于认为是可乘的而不是可加的,而一般经典的统计检验方法则常常是检验样本平均值之差值的显著性,这是一个矛盾。采用对数正态分布,则雨量对数的差值正好是雨量真数的比值,检验对数的样本平均值之差值的显著性,就相当于检验效果的可乘因子的显著性。这就自然地使效果的可乘性和通常关于差值的统计检验方法一致起来了。如果取 Γ -分布,检验效果比例因子(反映在 Γ -分布上是尺度参数的改变)的显著性就要用Neymann等人建立的 $C(\alpha)$ 检验法。

拟合度多大才是可接受的呢?有人把拟合度大于0.05作为可接受的界限,这不妥当,因为0.05是拒绝原假设的判据,而要接受原假设,0.05是太小了,我们取0.50或0.80作为接受原假设的判据,这本来是一种约定,对于雨量来说,我们认为不小了。

作业样本和非作业样本方差均匀性的检验可用F-检验法,检验结果如果 $F > F_{0.05}$,则人工影响仍不能应用t-检验法,而应该用Welch检验法进行显著性检验。

在不知道统计变量属于何种分布的情况下,显著性检验一般采用非参量性检验法,如符号检验法,秩和检验法以及斯米尔诺夫检验法。秩和检验也要求两

个样本所代表的总体方差(如果存在的话)相等,所以也不是无条件的。

2. 效果的物理检验

所谓物理检验指的是根据云和降水的形成及其人工影响的物理机制,找出相应的物理效应,如微物理效应或宏观动力效应,作为效果的指标,进而通过试验来检验人工影响是否显著地改变这些指标。需要指出的是,所有这些指标,如同雨量一样,也是受许多因素制约的,它们在试验中也不是唯一地确定于播云措施的,存在着相当大的自然变差。要从中鉴别出人工影响的效果,除了效果特别显著或云的结构的时空变差特别小的情况以外,一般仍需采用统计检验的方法。所以,这种物理检验确切地说可以叫做物理效应的统计检验。在微物理效应方面,目前国内除了云中冰晶浓度在人工影响以后曾观测到有显著增加以外,其他物理量指标还没有见到有显著差异的例子,这与观测仪器、探测工作等一系列技术问题有关,是需要大力加强的领域。下面举一个不用统计学的物理检验例子,美国在阿里桑那州曾用两个AgI炮弹(每弹含AgI 25克)从积云的主体云顶垂直投下进行播云,播云后7分钟,观测到云顶上升1.35公里,主体云内温度上升0.75°C,在-5°C层的冰晶浓度达到 10^2-10^3 个/升,核心部位几乎完全冰晶化了,比原先增加3个量级,液态含水量小于0.004 g/m。上述动力效应和Weinstein等人的模式中计算比较,甚为一致。为了进行这种检验需要二架性能良好的飞机和一整套微物理观测仪器配套观测。近年来有一种日益明显的趋势,就是把一系列物理效应的检验和最终的降水效果联系起来,如对佛罗里达州动力播云试验的结果进行分析表明,物理效应和降水效果的相关甚为密切。一般讲,降水效果只有在物理效应上也能得到恰当的验证或解释时,才真正令人信服。

3. 效果的分层统计

效果检验的一个很重要的问题,是要判断在什么条件下有效或效果较好,也就是说要根据试验结果确定有利的天气条件和试验对象,这就要对试验结果进行分层统计,把试验资料按某种物理属性的取值大小分成几个层次,然后分别对各个次级层次的资料进行效果检验。分层的方法很多,福建古田县试验按对比区雨量的大小分层统计,结果发现对比区雨量强度小于1mm/hr,播云效果比较好,相对增加率超过100%,显著性水平 $\alpha < 0.01$,而当对比区雨量强度大于3mm/hr时,播云效果就很不显著,特别对积状云降水,效果是负的,当然这个负效果也是不显著的,属于自然变差的可能性大。Grant等根据云顶温度对7个随机试验分别进行分层统计,发现云顶温度介于-10—-25°C的层次,播云效果最好,于是把这个范围称为播云有效的“温度窗”。Gabriel对以色列的试

验结果按大气层结特性分层统计,发现各个气象因子的取值范围为下述数值时效果较好:(1)700mb 的温度为 $-5-7^{\circ}\text{C}$;(2)500mb 风向介于 $300-210^{\circ}$;

(3)500mb 风速升于 $0-35\text{ knot}$;(4)Showalter 稳定度指数介于 $4-7$;(5)从地面到500mb的可降水量为 $0-11\text{mm}$ 。他还发现上述各指标对效果的影响彼此并不相关,于是提出一个综合指标:各物理量取值位于上述范围之内者,其指标数为1,在其外者指标数为0,然后将试验结果按综合指标分层,结果发现综合指标为2和3、4时,增雨量分别达到36.4和52.8%,相应的显著性水平达0.051和0.016。

分层统计的重要性还在于它有时能提供新的证据,有些是我们暂时还不理解的甚至是与成见不相容的证据。例如在瑞士的地面烧AgI烟的防雹随机试验中,对降水的效果进行分层统计,原先认为大气存在稳定层时效果一定不好,所以想通过按有无逆温层分层统计,剔除这种“不利”的因子。谁知分层的结果发现事实与设想恰恰相反,当低空存在稳定层时效果很显著,而不存在稳定层时,效果大为减小。只是在事后,人们才对此作出气象上的解释:阿尔卑斯山南坡白天增热,破坏了稳定层,原先积聚在稳定层下的催化剂随着云的发展而集中释放出来,从而提高了播云效果。

4. 数值模拟试验在效果检验中的作用:

Scott提出应该对播云条件有利程度不同的云进行试验,然后通过分层统计找出真正有利的播云条件,这样才会不为错误的先入之见所迷惑。但这种观点在我们看来,无异于因噎废食。由于害怕先入之见不正确而一概拒绝气象和物理知识的引导,是不可取的。而且,这种泛泛的试验,效果检验的能效很低。Neymann和Scott自己就曾经指出,在一定的假定条件下(例如雨量服从 Γ -分布,其密度函数的形状参数为0.70,尺度参数为0.20),单区随机试验的效率是很低的,如果显著性水平取0.10,并且取试验单元 $n=100$ 的话,则要鉴别出20%的播云增雨效果的概率最多只有0.20,当增雨量为50%时,这个功效为0.60,仍不很大。要知道在人工影响天气的试验中, $n=100$ 已是很大一个数了。能效不高是单区随机试验的主要弱点。为了提高统计检验的功效,需要选择适当的预报因子(回归分析中对比区的雨量就是一种预报因子),在一定的预报因子取值条件下,研究对象(统计总体)的条件变差,即自然降水量的条件变差就可以大大减小,从而提高了统计检验的功效。云和降水物理过程的研究,特别是数值模拟试验可以提供这种预报能力,不仅能够预报自然降水过程,而且能够预报人工影响后的降水过程,至少大致上能做到这一点。美国佛罗里达州的积云动力播云试验表明,利用数值模拟的这种预报能力,使试验的盲目性大为减小,试

验效果也更为显著,增加雨量3倍之多!中央气象局人工影响天气研究所以及有关单位结合人工降水试验,开展了数值模拟研究。这类模拟试验不论是对人工降水试验,还是对积云发展和降水机制的研究,都是有意义的,是需要大力发展和研究的领域。

四、结束语

我们是在对云和降水的物理过程有一定的认识,但认识还是不十分确切的情况下从事试验的。而且,我们是在对人工影响的措施对云和降水的物理过程的作用有一定的了解,但了解是十分不全面的情况下从事试验的。正因为这样,试验效果不是确定无疑的,所以效果的客观评价就显得格外重要。也正因为我们的认识能力有限,所以效果的检验就成为一个相当困难的问题。尽管有一些统计检验方法可供客观评价之用,但这种统计效果所提供的只是一些证据,而不是证明,只有统计效果能获得物理上的解释,并为观测到的物理效应所证实的时候,结论才是完整的,真正令人信服的。这是效果检验工作的目标,实际上这也是人工影响天气科学实验发展的一个重要方面。

要通过试验了解人工影响的效果和作用原理,这有赖于对试验的效果进行客观的评价,反之,要对试验效果进行客观的评价,又有赖于对自然的和人工影响的物理过程的了解,二者之间相互依赖、相互制约。所以说,效果检验必须和对云物理过程的研究结合起来,效果的统计检验必须和物理检验结合起来,这是效果检验的发展方向。

目前有两个主要的困难阻碍着效果检验研究工作的深入开展,一个是缺乏必要的观测设备和观测手段,另一个是试验往往缺乏合理的周密的设计。前者是条件问题,后者是实事求是的科学态度问题。首先是观测设备和观测仪器问题,这个问题的解决不仅对效果检验是重要的,对整个云物理和人工影响天气的研究都是十分重要的,而这方面我们和国际水平的差距也最大,所以是一个特别突出的迫切需要解决的问题。效果检验没有可供分析的完整的资料,结论只能是含糊不清的。有了必要的观测手段,进一步的问题是要研究试验的方法。试验无计划,就不能合理地取得资料,有了一些资料也不能恰当地加以运用,从中获取最大的信息供判断之用。从目前国内对人工降雨的效果分析来看,必须强调用科学的态度来对待这项科学试验,试验必须有相应的设计,分析必须力求客观。效果检验本来是一项比较困难的研究工作,要达到客观性好,分析效率又高的检验水平,还有许多工作要做,这要有各方面研究工作的相互配合。“科学有险阻,苦战能过关”。效果检验这一关,不能回避,只能攻克。