检验人工降水效果的协变量统计分析方法

胡 志 晋

(一)

人工降水试验的效果可以用作业地区作业时段的雨量（Y）同相应的自然雨量期待值（$\hat{Y}$）来对比估价。雨量（Y）可以实际测定。自然雨量期待值（$\hat{Y}$）需要估算，在一般统计方法中是用对比地区或对比时段的雨量（X）来统计估算$\hat{Y}$值：$\hat{Y}=\hat{Y}(X)$。但是这种回归方程往往不太稳定，随机试验中作业组和对比组往往存在非随机偏差。我们可以用其它的物理量（u、v）来估算（$\hat{Y}$）值。如果这些物理量同降水有密切关系，本身又不受作业的影响，那末就可以通过这些物理量的观测来估算作业区的自然雨量期待值。这就是物理统计方法。这些物理量在统计上称为协变量。我们首先用不作业的资料，包括历史资料或者对比试验单元的资料，求出某些物理量同雨量的回归方程$\hat{Y}=\hat{Y}$（u、v……）。通过统计筛选得出有较高显著度的多元回归方程。用作业时的观测资料（u、v）代入上式即可求出$\hat{Y}$值。这一方法的基本假定是回归方程所反映的这些物理量同雨量的关系在空间上和时间上应该是稳定的、显著的。如果我们选择的协变量同雨量具有内在的物理联系，统计得出的回归方程能够反映内在的物理规律，那末用来检验人工降水效果就会比较可靠。

这种方法在50年代曾多次应用，叫气象控制法，当时多半只选用高空气象参数，回归方程的显著度不高，长时间里进展不快。近年来由于雷达等观测技术和数值模拟的迅速发展，选取协变量的范围扩大，这种方法有了新的发展并得到了一定的成功。

美国佛罗里达地区积云试验中根据1970—1975年的不作业试验日的资料得出回波移动日的地区雨量

$$\hat{R}=1.367+0.102C+7.817P。$$

式中C为该日14时（作业前）的雷达回波面积，P为穿云作业前一小时的目标区雨量。这一回归方程是用当地当天作业前的回波特征和雨量来预报当天的雨量，实际上相当于短期外推预报。用这一方法得出人工降水的增雨效果超过50%，显著度水平达到5%。另外，物理统计方法还可以对一般随机统计方法中自然降水条件等效的假定加以检验。在该例中曾经用作业日和不作业日的物理量计算了两组的预报雨量。结果得出作业日的预报雨量比不作业日的预报雨量少20%，说明作业日的降水条件较差，两组并不等效。统计得出偏差的显著度为14%，说明这种偏差的存在虽然不能作为定论，但可能性很大。看来用随机对比方法在本例中很可能低估了作业的增雨效果。

苏联乌克兰夏季积雨云增雨试验中根据自然云雨的观测历史资料统计得出：

$$tgQ=0.12H+0.95lgS-0.20h+0.20$$

式中Q为雨量；H为云厚；S为回波面积，h为云底高。这一回归方程是用实测的云物理参量推测云的雨量。它的物理意义清楚。假如人工降水作业对这些云物理参量没有作用而只影响其雨量，那末就可以用这一方程来预报自然雨量期待值从而检验效果。根据当地试验结果，作业对当地积云云顶高度没有显著的作用，故试验者认为可以用来检验效果。根据1973—1976年58次随机试验得出作业云的降水条件比不作业的云差得多，物理回归方程得出的作业云预报雨量比不作业云小得多。说明在该项随机试验中存在着明显的非随机偏差。采用作业—不作业和实测—预报双比法得出人工降水增雨35%，显著度为10%。用一般的随机统计对比方法则得出雨量减少但不显著的结果。

这种物理回归方程不仅可以用来预报雨量也可以预报其他参量。如苏联乌克兰夏季积雨云增雨试验中就用下列方程预报积云能否降雨：

$1.14H-0.16t+0.05f>7.46$　降雨；

$1.14H-0.16t+0.05f<7.46$　不降雨。

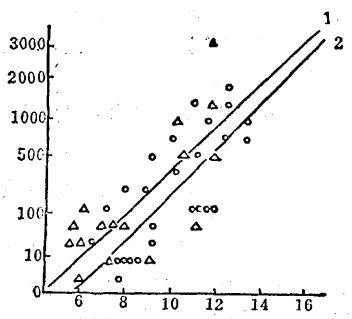
H为云厚；t为云顶温度；f为大气平均相对湿度。这一判别式是根据当地180块积云资料得出的，精度为83%。用人工降水作业云的观测值代入方程得出降雨机率期待值，比实际作业后的降水机率略大。说明当地积云用干冰催化激发降水有一些作用。

(二)

在人工降水试验中，积云数值模拟取得了一定的成功。最明显的例子就是美国佛罗里达的单云催化试验。他们用一堆积云数值模式预报自然积云顶高和作业后增长的云顶高。计算的自然云和作业云顶高同实测的相应云顶高相当符合，而且表明了作业使云顶高

有明显的增长。这样就明确地表明了积云动力催化对云顶增长的效果。用模式计算预报积云内最大升速、是否降雹等也取得了一定的成功。但是用模式直接预报雨量，特别是地区的雨量，至今还存在着很多困难。因为积云的雨量不仅依赖于大气温湿状态，而且同低层辐合、地形影响、锋（槽）等天气动力过程有密切关系。目前还难于建立一个考虑到各种因子及其相互作用的积云降雨模式，还不能较好地预报雨量。另外在日常业务中由于计算时间和费用的限制，不能采用十分复杂的模式，目前国内外日常业务大多数采用一维模式。这种模式主要反映了大气温湿状态对积云降雨的作用，直接预报雨量往往不很成功，所以常用模式输出量同实际雨量作统计回归分析，求出它们之间的关系，即$\hat{Y}=\hat{Y}$ (a、b)，式中 a、b 为模式输出量。在试验日子里就用当天资料代入模式，计算得出 a、b。用回归方程 $\hat{Y}=\hat{Y}$ (a、b) 求出自然雨量期待值，通过同作业后的实际雨量 Y 对比得出人工降水效果。

美国北部大草原的《捕云机》增雨试验中根据雨量直接统计对比，得出作业的雨量平均值比不作业的大，但不显著，得不出结论。他们把各天雨量同模式计算的云顶高作统计回归，结果列于图中。碘化银催化日的雨量和计算云高回归线在不作业日之上，说明在相同的计算云高下作业日的雨量比不作业的多，两条回归线差异的显著度为 5%。由此得出该试验中碘化银催化增加了雨量。另外从图中还可以看出，增雨量同自然雨量期待值的关系，即随着自然雨量的增大，增雨量也有所加大，但相对比值则有些减小。



附 图

《捕云机》计划中模式计算云顶高和雷达测定降雨量的关系图（图中“○”表示不催化，“△”表示 AgI 催化）

我们可以把物理统计方法和模式输出统计方法结合起来，用物理量和模式输出量作为协变量来预报雨量，即$\hat{Y}=\hat{Y}$ (u、v、a、b)。美国佛罗里达地区在“回波移动”日子里的降雨量根据 1970—1976 年的资料筛选出下列回归方程：

$$\hat{R}=2.181+1.9075\cdot P\cdot S$$

式中 P 为催化作业前一小时的地区雨量；S 为模式计算的可播度（即计算的催化云顶高减去计算的自然云顶高）。把这个方程求出的自然雨量期待值$\hat{Y}$和实测雨量 Y 相比。对 29 个作业日的 $(Y-\hat{Y})$ 值平均为 2.140，变率为 4.994；对 19 个不作业日 $(Y-\hat{Y})$ 值平均为 0.439，变率为 1.800。用秩和检验得出两组雨量平均值差异的显著度为 1.5%；变率差异的显著度为 0.004%。这说明作业后雨量和变率都明显加大。

目前协变量统计分析方法正在迅速发展。这一方法的实质同天气预报相同，但对预报量的精度要求很高，而对预报时效则没有要求。我们选用的(协变量)预报因子可以是作业前观测的或计算的物理量，也可以采用作业时或作业后的物理量，只要保证后者不受作业的影响（即不被作业“污染”）。前一种协变量可称为预报因子；后一种可称为检验因子。雨量统计对比实际上就是用同时间的对比区雨量作为检验因子。美国现在正进行着大量的工作来统计筛选出各不同试验地区雨量的协变量。预报因子采用早上 6 时的资料，包括大气温度、水汽、稳定度、风向风速、切变和一维模式的各种输出量。有人还选用地面气象要素场、温湿平流、辐散场等。这些预报因子数量很多，因子之间往往具有较高的相关，所以采用分组筛选，再逐级回归，最后得出较好的多元回归方程。

在筛选回归时应注意资料的分类。因为不同类型的降雨其物理过程有所不同，回归方程也不同。如果混在一起统计，回归方程的离差就较大，显著度就会降低。如果能用一定的指标将资料分类，往往能够显著改善它们的预报精度。如美国佛罗里达地区就强调当地降雨日必须按回波移速分成两类——回波移动日和回波静止日。两类日子的雨量预报因子和预报方程相差很大，人工降水作业后的效果也有显著的差别。分类之后检验出来的人工降水效果就明显确定得多。

(三)

我国在 60 年代曾有人用云厚预报积云降水机率，把江西省自然积云观测结果同湖南省飞机作业云的观测结果对比，发现盐粉催化能提高降水效率，即能激发一些积云降水。可惜这两组资料观测的方法、地区都不相同，所以这种对比相当勉强。湖南省曾试用模式计算的积云顶高来预报雷达回波顶高和雷雨。最近吉林省着手寻找层状云雷达回波厚度同地面雨量的关系；内蒙古自治区着手研究模式输出值同回波顶高、雨量等的相关。这些都是良好的开端。

当前在人工降水试验研究中特别强调把云物理观测、数值模拟和统计分析结合起来。协变量统计分析方法就是把三者结合起来的具体途径之一。近年来各地观测装备的改善、观测和模式计算资料的积累，为这项工作的开展提供了必要的基础。我们可以根据云参数（如云厚、云底高、云底和云顶温度、含水量、冰晶浓度、大滴浓度、云内升速等）、雷达参数（如回波顶高、厚度、面积、强度、移速、时间等）、气象参数（大气温湿分布、风、散度、涡度等）以及模式输出量（云顶高、云底高、最大升速、动力可播度、雨水量等）筛选求出雨量（或降水机率、降雹机率）的协变量回归方程。当然要得出有一定显著度的、稳定的回归方程需要化费很大气力。这本身就是一项重要的云物理研究工作，它有助于揭示云的形成和降水的物理规律和提出定量降水预报的线索，进而验证并改进数值模式。在此基础上我们可以用作业时的观测值或模式输出值代入回归方程求出自然雨量期待值（$\hat{Y}$），从而估价作业效果。在随机试验中我们实际观测了作业单元组的雨量（Y）和不作业组雨量（X），根据回归方程可以计算出相应的雨量期待值（$\hat{Y}$）和（$\hat{X}$）。比较 $\hat{Y}$ 和 $\hat{X}$ 可以了解这两组资料的非随机偏差，即两者在降水条件方面是否等效。比较X和 $\hat{X}$ 可以检验回归方程的预报能力。比较Y和 $\hat{Y}$ 可以对人工降水效果作业估价。比较X和Y就是一般的统计验证效果。几方面结合起来就可以得出比较可靠的结果来。

用这一方法可以求出逐次作业的 $\hat{Y}$ 值，同各次实测值Y对比，可以估价各次作业的效果。当然这种估价不很可靠，但是可以帮助我们分析在哪些条件下效果较好，在哪些条件下效果较差。根据这些条件（指标）分层统计就可能得出更为明确的效果，并指出作业的适宜条件（即催化窗口）和适宜技术，指出提高作业实效的途径。

目前这一方法一般都用于积状云降水，我们认为对于层状云也是可以试用的。我国北方层状云人工降水试验多采用飞机作业。飞机作业选择的地域很大，在一个较小的固定地区作业的次数不多，用地区雨量统计分析有一定困难。飞机作业时可以进云观测，提供大量资料，再加上雷达、探空、地面观测等资料就可以筛选得出较好的雨量回归方程。由于层状云的宏观特征主要受大中尺度天气系统控制，作业“污染”的可能性较小，可以用作协变量来预报和检验效果。这种回归方程估计能适用于一个较大的地区。在这个较大地区里进行的试验都可以作为样本进行统计。这样就可以在较短时期里对该地区的人工降水效果作出估价。