

当前国外人工增雨防雹作业的 效果评估

章澄昌

(北京气象学院, 100081)

提 要

统计学家推荐随机化播云试验作为人工增雨防雹作业的最佳效果检验方法,但在业务性作业中却难于实施。作者综述国外人工影响天气主要外场试验计划实施中的缺陷和经验教训,以及近年来对两个最受推崇的随机化试验的争论,并通过实例说明人工影响天气的效果评估可基于无分布推断法,以简化试验设计并提高检出功效。

关键词: 人工增雨 防雹 效果评估

1 对人工影响天气效果评估历史的回顾

正如 Changnon(1986)^[1,2]所述,人工影响天气的效果评估经历了一个从依赖统计检验,强调随机化试验到重新注重经验证据,学会如何正确设计作业方案,探索物理因子同统计检验结合为一体的试验研究和业务性作业的大轮回过程。它包括两方面的含义:一方面随机化试验的实践结果并不理想,起因并非技术上的科学性,而是设计、管理、经费等方面的问题;另一方面 70 年代末随着计算机技术的发展,非参数化检验获得新的发展和运用,检出功效明显提高。

1.1 大多数随机化试验设计包含了可引起统计偏差的多重性和主观判断

多重性:源于对数据的多种分析(分层)所产生,在方案设计时未事先说明,使统计计算不及原先的显著。含多重性问题的计划包括:佛罗里达地区积云试验 I、以色列 I、北达科他试验、狂飙试验、塔斯马尼亚试验和白顶试验。

催化作业中的主观判断:表现为佛罗里达地区积云试验 I 事后定义其目标区,而且

大的增雨归结为 5~6 个催化日, Nickerson(1979)用附近地区作为控制区重新分析,认为属自然变化。同时作为其证实性计划—FACE-I 失败又在于有一未催化日降了异常强降水,由此提出了如何对待和评价大雨日此类极端事件的问题。另一个共同的问题是在分析数据前,数据处理人员是否允许获知催化和未催化抽签结果,北达科他试验关于增雨或防雹的选择。

1.2 对美国四个外场计划的综评

所选的计划满足:① 长期外场试验;② 处理不同天气—雹、雨、雪;③ 由不同机构实施和资助;④ 耗资最大;⑤ 最为著名的计划。基本特征如附表所示。

1.2.1 NHRE 国家计划,耗资最大,组织最强,源自前苏联 60 年代早期高加索山区防雹成功的考虑,目的为研究雹暴和检验前苏联防雹假说。由 NCAR 指导和管理,3 年外场试验未获防雹效果而于 1975 年中止。由于设计、作业和评价等方面的争论,延续了 4 年的资料分析,1979 年结束时仅达部分目标—对洛杉矶山区雹暴特征有较深了解。

1.2.2 FACE 包括早期加勒比海海上的成功外场试验,1965年移至佛罗里达半岛,以靠近雷达站,加之新焰弹可在陆地安全使用,遂变成积云催化试验。FACE II (1978~

1980年)证实性计划产生分歧,主要针对结论的解释和评价,在管理和实施间的分歧,大大影响了其进展和最终结果。

附表 美国主要外场计划的基本特征

	国家冰雹研究试验 (NHRE)	佛罗里达地区积云试验 (FACE)	塞拉合作试验 (SCPP)	农作物人工增雨试验 (PACE)
关注热点	抑雹和高原雹暴	热带云和增雨	冬季风暴和增雨	夏季增雨和效应
何处实施	科罗拉多州东北	佛罗里达州南(加勒比海)	加利福尼亚州中部	伊利诺依州中部
何时构想与实施	1966~1979	1968~1980	1976~1988	1971~1990
研究活动时间	1967~1979 (13年)	1963~1980 (18年)	1977~1988 (12年)	1971~73, 1977~90(16年)
总基金(10 ⁶ \$)	35	25	25	7
主要实施单位	国家大气研究中心	NOAA	内务部农垦局	NOAA/伊州水测量部 (1977~88年)

1.2.3 SCPP 内华达塞拉山区集水区冬季播云增雪储水,初始阶段科学家之间针对最初设计、冬季风暴结构和播撒效应的分歧,有些问题源于仪器缺乏和仪器讯息误导,阻碍了进展;第二阶段(1982~1986年)解决前述问题后,因联邦基金于1987年结束,整个预算削减,使总结性研究不得不中止,最后结果不确定。

机构领导变更、重点转移、缺乏委托;⑤ 科学计划实施太差。

教训是深刻的,实施大型科学试验包括多年计划、探索研究、外场试验和评价,非常复杂且耗资巨大。应建立国家评审监督机构,由国家有影响的科学家组成,定期考察,确保对计划的指导。主要机构和基金单位保持对试验目标的关注和实施。

1.2.4 PACE 州和联邦资助,但由4个中西部州立大学和州水测量部共同负责。目标为检测中西部夏季降水是否增加和考察改变雨量的影响。作为对几个夏季缺乏农业用水的一种对策,迫于地方压力,采用未经证实的播云方法,加之州指导与联邦基金机构之间分歧,使进展迟缓。

2 有关对两个最受推崇的随机化试验的争论

2.1 对克里马克斯(Climax)计划的争论

科学家之间的分歧归纳为:① 资料不适用于研究目标;② 对目标的不同解释影响试验设计;③ 计划与实施作业的矛盾;④ 仪器不到位、不协调、次序改变;⑤ 统计和物理评价方法上的分歧,探索性与证实性间的误解;⑥ 对结果解释的分歧;⑦ 交换资料合作论文中由合作者转化为争论者。

Climax 计划在人工影响天气历史上占有重要地位,它是少数在统计上具有显著性并获得物理解释的播云增雨成功试验之一,而且它标志着广泛进行播云作业的开端。在WMO组织的第一次人工影响天气科学会议(1973年)上与以色列人工增雨计划并列,作为可接受的两项试验计划。WMO第二次人工影响天气科学讨论会(1976年)上,仅剩以色列计划一项。

导致分歧的原因有:① 不适合的科学基础;② 计划过程中的缺陷和计划指导改变;③ 基金资助单位不尊重科学;④ 计划管理

Hobbs 和 Rangno 多次批评 Climax 试验的概念模式和统计结果(1979^[3],1987^[4],1993^[5],1995年^[6]),重点在于随机化设计的具体实施中有许多疑点:① 500 hPa 温度不能代表云顶温度,其间的高相关性不具有气

候代表性, Climax I 和 II 500hPa 温度较暖, 其增雨均无统计显著性; ② 在洛杉矶地区的云中测量表明冰晶浓度与云顶温度关系不密切; ③ 控制区雨量缺乏代表性; ④ 资料剔除在统计上站不住脚, 部分资料有误。

2.2 对以色列计划的争论

以色列工作为唯一认可的人工增雨随机化交叉试验, 基概念模式为以色列冬季大陆性地形云, 窄的云滴谱, 不易通过碰并产生降水, 云体维持时间长、缺乏自然冰核, 具有静力催化可播性。1982年 Science 发表题为“35年中唯一成功的播云”, 引导公众支持人工影响天气活动, 促进当时一些国家增加经费, 支持人工影响天气作业。受以色列 I 的影响, WMO 在 1976 年 11 月在西班牙、阿尔及利亚、突尼斯实地考察, 了解当地云的可播性, 赞助增加降水计划 (PEP), 基本上按以色列 I 的计划重复实施。PEP 虽在 80 年代初未进入播云即宣布中止, 但以色列计划至今仍被广泛接受, 甚至把增雨率 13%~15% 作为主要参考数据。

Rangno 和 Hobbs (1995)^[6] 发表长篇论文对以色列计划提出异议, 从实测的以色列云的微结构和对以色列播云的关键作业特征进行再评价, 认为以色列 I、II 对播云增雨均无统计显著性。其基本论点为:

① 据 12 季 (1973~1975 年, 1978~1987 年) 以色列气象局探空资料, 认为以色列降水气候并非该计划所描述;

② 实测云微物理 (Rangno, 1988; Levin, 1992) 表明云中冰晶浓度在 -12°C 和 -10°C 分别为 $50 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1 \sim 10 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 云底大滴 ($d \geq 25 \mu\text{m}$) 浓度达 $250 \sim 400 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, -14°C 时云塔在 4min 后冰晶化, 认为在以色列当云顶 -10°C 时, 其所具有的冰晶浓度可发展降水;

③ 以色列 I 的统计分析受 I 型统计误差 (即幸运抽签或假的正效应) 的干扰。有三

种证据支持此论点: a. 非催化过渡区在播云日具有统计显著的高降水量; b. 高的 S/NS 比率在沿海岸区实际上位于线状播撒轨迹的下方, 比下风区更低; c. 在黎巴嫩、叙利亚和约旦更广阔的地区, 其 S/NS 较大, 在某些情况下比以色列 I 的目标区还大。

从关键作业特征考虑了三项: ① 以色列 I 实施的播云小时数与对播云的影响对比, 7 个季播云总时数 905, 比例为 905/9144; ② 播云影响的云体积, 相对于几小时的飞机播云线只有很少的对流云体积受播云影响; ③ 缓冲区是否已受无意识播云影响? 按 850hPa 的风向, 缓冲区不受无意识播云影响, 其高降水量的可能解释只能是 I 型统计误差。

以色列 II 播云试验, 其两个目标区的统计分析在外场试验完成后 15 年 (1990 年) 才作出, 按原先的交叉设计, 表明无明显效果。随后的分区分别评估已属单区试验, 排除了交叉设计的探索性分析, 其中考虑了雨量的自然偏差。结果为北区播云增雨, 南区减雨, 实质是在有些催化日其相应自然降水量很大所致。

Dennis (1996)^[7] 当年曾参与 PEP 前期的考察工作, 认为以色列 I、II 在当时也并非完全接受, 在统计和微物理方面均有疑问。他的基本观点是以色列 I 按原先的交叉设计, 交叉目标污染对如此明显的影响不应考虑。自然雨趋势在北部或中部播云日重一些, 但不能作为明显的影响。因随机交叉试验设计对这种可能性具有补偿作用。可能的原因在于 ρ 值 (0.02), 同时还存在其它播云概念模式。以色列 II 并非重复以色列 I, 因目标区不同、催化方法不同, 统计方法也不同。以色列 I 中仅分析北部目标, 并借助上风控制站, 未涉及南区。考虑到这些差异, 以色列 II 从未认定是 I 的证实性计划, 但以色列 II 的失败也不能推翻以色列 I 的结论。对该计划统计

显著性和微物理特征的争论,有助于说明增雨试验不可能仅通过单次计划就能论定。

从1975年11月起,北区试验停止并转为业务性播云,南区开始探索性试验,即作为以色列Ⅲ一直持续至今。Nirel和Rosenfeld(1995)^[8]取作业阶段1976~1990年,对所有雨天均播云。按历史期资料(对数模式)进行历史回归分析,建立在目标区与控制区降水相关稳定性上,而非雨量稳定之上。播云效果由双比统计估计,1976~1990年相对增雨6%($\alpha=0.02$)。按95%的置信区间(1.01, 1.12)效应估计,对相应时期的灵敏度分析表明为持续正效应。考虑到历史回归的谬误可由目标区、控制区降水之间关系的时间变化趋势引起,故通过模式参数和相关气象变量的时间序列来考察,发现无显著的时间变化倾向。

显然6%的增雨效果低于13%~15%,对此的统计解释是两种估计均位于统计变化范围内,同时低效率与减少平均播云时间[单位播云线(km)的飞行时间]42%有关。

Levin(1997)^[9]采用三维中尺度模式对以色列惰性播撒剂的扩散进行数值模拟表明:播云判据按700hPa风向,经对以色列中部的探测,表明一般是正确的,但广泛播撒的静力催化方式对增雨作业来说并非很有效。要求在-10℃高度、冰核浓度大于10~30个 $\cdot L^{-1}$,仅靠水平风和上升气流输送受到很大限制,而且实际的有效扩散决定于播撒高度和云的发展阶段。改进的途径是运用雷达、飞机探测,采用火箭或焰弹,有效地保证催化剂直接进入发展的上升气流区并具有相应的浓度。

3 业务性作业的效果评估可采用无分布推断法

无分布推断法基于对象在现实集合中的具体排列分布(例一个样本的试验单元),尤其是无分布推断法包含了与任何完善定义的

检验统计量的有关的排列检验,诸如非参数检验、复随机化检验和排列检验。

3.1 复随机化检验

复随机化检验是对同样的试验单元基于播云和非播云重新随机选择的大量模拟结果与试验结果比较。每一种模拟的播撒与非播撒的规定频数与实际规定频数一致。在许多例子中,所研究的统计量的排列分布可能很难表达。这种情况经常出现,即使限于表达诸如平均值、方差和偏斜度等统计量的几个严格的低阶矩时也如此。复随机化为解决此类其它方法难以处理的问题提供了合适的方法。

犹他冬季播云计划的最新评价(Driffith等,1997)^[10],采用目标区和控制区历史资料相关分析,适于资料序列 $n \geq 20$ 年。要求两区相近、历史相关、控制区不受催化影响。由两组资料建立回归方程,以控制区观测降水,预报目标区降水。

犹他中部和南部,19个冬季(12月~3月)于地面上风坡(山谷或山脚)设置碘化银发生器进行人工作业,目的在于增雪以便增加春季径流用于灌溉。

历史资料:1956~1973,1984共19年;播云计划:1974~1983,1985~1987,1988~1996共19年。目标区和控制区线性相关: $r=0.966$, $y_c = -2.69 + 1.38x$, x 为控制区平均观测雨量。19年中每年 $y_o/y_c > 1$,即催化雨量未出现小于预报值。平均 $y_o/y_c = 1.146$ 。

对该资料集应用蒙特卡洛试验,19个随机抽样由计算机程序进行,从资料集38年(12月~3月)中取19个指定为播云,其余19个为未播。 y_c 对“催化”年计算,按此随机选择得 y_o/y_c 比率,此过程重复1000次。采用比率的90%作为随机化区间估计,即为随机获取比率值的闭合区间,表示成 $[R_{0.05}, R_{0.95}]$,作为置信限,把1000个虚拟的比率按序排列,对从播与未播年计算的比率来说,51至950的值取为90%置信时间。

H_0 : 播云不改变自然出现的降水量, 对双侧试验若比率(R)的一个观测值小于 $R_{0.05}$ 或大于 $R_{0.95}$, 则拒绝原假设。

当这些随机试验采用 38 年中每年 12 月~3 月降水资料实施时, 90% 的置信限为 $R_{0.95}=1.06$, $R_{0.05}=0.95$ 。在 1000 次随机抽样中, 比率排列从 1.146 作为顶, 至 0.899 作为底, 实际催化年为 1.146 ($R_{0.999}$ 水平), 其序号远高于 $R_{0.95}=1.06$ 水平。蒙特卡洛试验 1000 次随机抽样表明这些结果的显著水平好于 0.05。

在蒙特卡洛试验中目标对控制主分量回归, 相对于双比, 目标对控制回归、目标中播云样本对未播云样本和非参数秩和检验, 其检出功效最高 (Hsu, 1981)。

3.2 多响应排列法 (MRPP)

MRPP 很适于小样本 ($n \leq 25$), 它是一种普遍使用的统计推断方法, 几乎不需要任何假设, 而且似乎对各种试验都具有一系列潜在的有效统计推断分析。

北达科他谷物保险资料作为播云效果检验的探索分析 (Smith 等, 1997)^[11]

冰雹气候研究表明, 北达科他的雹灾损失属全美最大, 其西南部保险赔付最高。50 年代起作业, 1976 年制定北达科他人工影响云计划 (NDCMP), 遵从 MRPP (Mielke, 1981)^[12], 飞机对夏季对流云云底播撒成冰催化剂 (AgI 复合剂、燃烧 AgI 丙酮溶液和焰弹)。由地基雷达指挥。1976~1988 年, 目标区包括 6 县, 面积 26278 km²。两种目标: 抑雹、增雨; 两种作业方式: ① 进入云底上升气流区 (占 3/4, 与云体积混合, 时间控制在云增长至 -10℃ 时, 能充分扩散, 使之在暖于自然冰核化 5~10℃, 3~5 分钟发展降水); ② 直接穿入云顶 (焰弹) 或近云顶注入 (干冰, 共占 1/4)。

历史资料分析: 1924~1988 年共 65 年, 统计 NDCMP 目标区 (扣除 1934 年保险责

任太小, 低到 20/21 故略, 实为 64 年) 和蒙大拿控制区的谷物雹灾损失比率年值 (%)。

目标区: 雹灾损失比率年值最低为 1939 年, 0.02%, 最高为 1963 年, 19.75%, 64 年的中值为 4.83%, 60 年代播云抑雹后有明显下降。关注 1976~1988 的 13 年, 其中只有 2 年高于 64 年的中值。

控制区: 最低为 1988 年, 0.25%, 最高为 1937 年, 19.22%, 65 年的中值为 6.10%, 无明显历史变化倾向, 1946~1960 年明显偏低, 但其中 5/14 仍高于中值, NDCMP 期间 6/13 高于中值。

为探索 1976~1988 年后 13 年是否明显不同于 1924~1975 年, 进行置换分析, 采用一元模式中的多反应置换程序选择 13 年损失比 (不置换), 从 64 年资料中随机选择, 其余 51 年组成比较组。两组分离的侧重与每一组内的散布有关, 并进行计算, 此过程重复至所有可能的各种选择。将这些试验统计排列, 比较实际区分的相应试验统计以决定 P 值。

MRPP 双侧 P 值: 64 群中的 13 年随机样本以 NDCMP 为最小, $P=0.006$, 不能从随机选择来解释, 实际 P 值最小表明, 这是事先选择的, 即目标区雹灾损失明显减小。同样的单变量, MRPP 试验用于控制区历史资料, $P=0.62$, 说明 NDCMP 的 13 年不能区分, 由此说明人工作业抑雹的作用。

目标-控制比较: 目标区对控制区损失比的年比率 (一种两比), 从 0.004 至 8.04, 64 年的中值为 0.89。13 年 NDCMP 中包括 3 个最高值中的 2 个高于中值, 但却有 10 个低于中值。若这种选择是随机事件, 则 $P=0.046$, 说明 NDCMP 年份目标区的雹灾损失偏低。

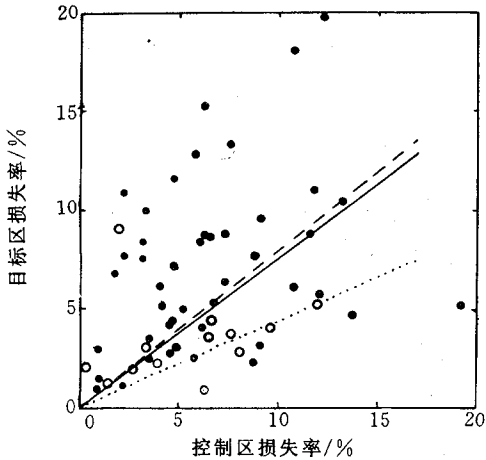
主要统计目标-控制比较基于目标-控制损失比 (LR) 回归线残留偏差的 MRPP 试验, 采用强制通过原点的最小绝对偏差 (LAD) 回归线 (如附图)。回归线斜率由 LAD 计算, 目标-控制 LAD 回归方程分别为:

LR(目标)=0.760LR(控制)

NDCMP LR(目标)=0.441LR(控制)

历史时期 LR(目标)=0.796LR(控制)

斜率的比率为 $0.441/0.796=0.554$, 说明 NDCMP 年份实际比历史资料回归低 45%。



附图 目标区和控制区年损失比(LR)的散布点比较 NDCMP 年份以圆圈表示,强制 LAD 回归线以点线表示,其余年份为实心圆点,强制 LAD 回归线为虚线,实线表示合成回归线。

4 结语

4.1 设计和实施一项随机化人工影响天气外场试验,历时长、耗资大、最费精力。

4.2 在业务性人工影响天气作业中,其效果评估推荐无分布推断法,在复随机化处理

中以主分量回归检出功效最高。

参考文献

- 1 Changnon, S. A., A perspective on weather modification evaluation, *J. Wea. Mod.*, 1986,18:1~5.
- 2 Changnon, S. A. and W. H. Cambright, Experimentation involving controversial scientific and technological issues: weather modification as a case illustration, *Bull. Amer. Met. Soc.*, 1990,71(3):334~344.
- 3 Hobbs, P. V. and A. L. Rangno, Comments on the Climax and Wolf Creek Pass Cloud Seeding experiments, *J. Appl. Met.*, 1979,18(9):1233~1237.
- 4 Rangno, A. L. and P. V. Hobbs, A reevaluation of the Climax Cloud seeding experiments using NOAA published data *J. Climate Appl. Met.*, 1987,26(7):757~762.
- 5 Rangno, A. L. and P. V. Hobbs, Further analyses of the Climax Cloud seeding experiments, *J. Appl. Met.*, 1993,32(12):1837~1847.
- 6 Rangno, A. L. and P. V. Hobbs, A new look at the Israeli cloud seeding experiments, *J. Appl. Met.*, 1995, 34:1169~1193.
- 7 Dennis, A. S., Changing perceptions of the israeli weather modification program, *J. Wea. Mod.*, 1996, 28,83~85.
- 8 Nirel, R. and D. Rosenfeld, Estimation of the effect of operational seeding on rain amounts in Israel, *J. Appl. Met.*, 1995,34,2220~2229.
- 9 Levin, Z. et al. Numerical simulation of dispersal of inext seeding materian in israel using a three-dimensional mesoscale model, *J. Appl. Met.*, 1997,36:474~484.
- 10 Driffith, D. A. et al., An update on a winter cloud seeding program in Utah, *J. Wea. Mod.*, 1997,29, 95~99.
- 11 Smith, P. L. et al., An exploratory analysis of crop hail insurance data for evidence of cloud seeding effects in North Dakota, *J. Appl. Met.*, 1997,36(5): 463~473.
- 12 Mielka, P. M. 人工影响天气试验的设计与评价. 史国宁等译,大气科学中的概率统计和决策,北京:气象出版社,1991:212~221.

Review of the Evaluation of Weather Modification Experiments

Zhang Chengchang

(Beijing Institute of Meteorology, 100081)

Abstract

According to statistician's views, randomization methods are considered most reliable for detecting cloud seeding effects. But evaluating the results of an operational cloud seeding program are rather difficult. Brief summaries of defects and experience of weather modification were confined to main weather modification activities that appear to be based on acceptable physical principles and which have been tested in the fields. An argument about two randomization experiments which won high praise is discussed. By citing some examples in point, the presently recommended analyses for evaluating weather madification experiments are based on distribution-free inference techniques.

Key Words: weather modification evaluation of seeding effectiveness hail suppression