

北京市人工增雨效果评估方法分析

李书严^{1,2,4} 李伟^{1,3,4} 赵习方⁵

(1 中国科学院大气物理研究所,北京 100029; 2 北京市气象局气候中心,北京 100089; 3 中国气象局大气探测技术中心,北京 100081; 4 中国科学院研究生院,北京 100029; 5 北京市人工影响天气办公室,北京 100089)

摘要 用序列试验法、回归分析法、双比分析法和区域回归数值模拟试验方案 4 种效果评估方法对北京地区 2001~2004 年 6~9 月的 37 次火箭、高炮催化作业进行效果评估,并比较各种方法的优缺点。结果表明:①这 4 种方案统计结果均得到显著的增雨效果,平均增雨分别为:用序列试验的方法 6.99%,用回归分析法 30.68%,双比分析法 20.11%,区域回归数值模拟试验方案 13.37%。②误差分析表明,区域回归数值模拟试验方案产生的绝对误差仅为 2.1%~2.2%,是一种较科学的评价方法。

关键词 人工增雨 序列试验法 回归分析法 双比分析法 区域回归数值模拟试验方案 效果评估

引言

人工影响天气效果评估是本学科亟待解决的一个科学难题,数十年来广大科研人员一直致力于这一课题的研究。目前科学界经常采用的经典非随机化效果评价方法是序列试验、区域对比试验、区域历史回归试验^[1]等,这几种方法简单易行,但是受天气形势或资料分布影响较大,结果也比较粗糙。

近些年来随着探测设备(如新一代天气雷达、机载或地基 PMS 等)的发展,人们利用多种探测手段获取播撒前后云体宏、微观参数的变化^[2],来证明播撒作业对云的发展及降水量带来的影响,或通过数值模拟^[3]研究云中微物理过程来证明播云物理效应。

随机试验效果统计分析虽然是科学界公认的科学评价方法,但是由于它需放弃约一半的作业机会,使得这一方案在业务中应用遇到困难。本文在经典非随机化效果评价方法的基础上提出一种灵敏度高、准确度高的非随机方案——区域回归数值模拟试验方案来科学评价人工增雨作业效果。

1 试验设计和资料处理

1.1 试验设计

1.1.1 试验期主要影响天气系统

北京地区夏季锋面降水较多,通常是由北方冷气团同南方暖湿气团交汇引起的,高空处在槽前强西南气流中,中低空有来自南海北部湾的较强水汽输送。另外还有蒙古冷涡引发的降水,蒙古地区上空 500 hPa 有闭合低压中心,并配合低温中心,系统深厚、移动缓慢,高空冷空气活动强,850 hPa 有暖湿舌,常可产生连续几天的降水。其次高空西北气流过境时,由于地形等原因产生的局地强对流也会产生阵性降水。这 3 种天气系统是试验期主要影响系统,是本项研究的对象。

1.1.2 影响区和对比区的设置

根据试验区试验期(6~9月)主要影响天气系统的移向和高空引导气流的方向(西北—东南)把影响区设在延庆区和昌平区,东西长 56 km,南北长 37 km,面积约 2072 km²。对比区设在作业点的上风方河北省的赤城县、崇礼县,面积大小与影响区一样。对比区和影响区之间有 30 km 的间隔带,防止催化剂对对比区的污染(图 1)。



图 1 试验区地理位置图(A 为对比区,B 为影响区)

1.1.3 作业条件的选择

(1) 天气条件。作业天气条件有 3 种:锋面降水,蒙古冷涡,高空西北气流。

(2) 引导气流的方向。500 hPa 高空风向为作业云引导风向。本研究中规定 500 hPa 风向为西风或西北风时适合作业。

(3) 作业云的回波参数。由设在北京市气象局的多普勒雷达提供作业云的回波参数,规定回波达到 35 dBz,回波顶高大于 7 km,以上条件时适合高炮或火箭作业。

1.1.4 作业单元的选择

作业单元规定为 24 h 降水量,即日雨量作为统计变量。

1.2 资料

(1) 历史资料:根据火箭、高炮增雨作业日的天气形势,按照历史资料必须取同期有相同天气形势的原则,选取 1991~2000 年共 10 年的 6~9 月对比区和影响区逐日降水量的资料,共 449 份。

(2) 催化作业资料:2001~2004 年影响区火箭、高炮增雨作业资料共 37 份(表 1)。

表 1 历史样本和催化作业样本数

	6 月	7 月	8 月	9 月	合计
作业样本 (2001~2004 年)	12	13	6	6	37
历史样本 (1991~2000 年)	106	145	110	88	449

2 效果统计评价方法

采用经典的序列试验法、回归分析法、双比分析法和本文提出的区域回归数值模拟试验方案检验催化效果。

(1) 序列试验法。即用影响区历史降水量的平均值作为试验期自然降雨的期待值,然后与试验期实测值比较得出增雨效果。效果的显著性检验采用秩和检验。

(2) 回归分析法。根据历史资料建立影响区与对比区的历史雨量回归方程,利用回归方程根据试验期对比区的雨量来估计影响区的自然降雨量。效果的显著性检验采用 t 检验。

(3) 双比分析法。以两区历史样本自然雨量的比值作为试验期两区自然雨量的比值,以此来分析作业效果。效果的显著性检验采用秩和检验。双比值 E 表示为:

$$E = \frac{R_1 / R_2}{R_{n1} / R_{n2}}$$

其中, R_1 表示试验期影响区雨量平均, R_2 表示试验期对比区雨量平均, R_{n1} 表示历史样本的影响区雨量平均, R_{n2} 表示对比区雨量平均。则平均增雨效果为 $\Delta E = E - 1$,效果显著性用秩和检验法。

(4) 区域回归数值模拟试验方案,根据与人工增雨同期天气形势相同的历史资料采用统计数值模拟方法建立增雨效果和增雨效果统计值均值的回归关系,然后利用这一关系式以人工增雨作业期增雨效果统计值均值来估算人工增雨作业效果。效果的显著性检验采用 t 检验。

2.1 序列试验

表 2 列出试验期各月及合计序列试验统计结果。序列试验结果表明:① 6 月份影响区的绝对增雨量为 2.201 mm,相对增雨 38.31%,但是效果的显著性并不明显。② 7 月份和 9 月份都检出了负效果,分别为 -30.56%和 -0.59%,效果不显著。③ 8 月份增雨作业效果显著,影响区雨量增加 6.105 mm,相对增雨 82.00%,显著性水平小于 0.05。④ 用序列试验法对几个月进行总体评估,4 年间在影响区共有 37 次作业,总的增雨量是 0.548,相对增雨 6.99%,效果不显著。

用序列试验物理意义上存在局限,因为降水时空分布有巨大差异。它假设作业区自然雨量在历史上是平稳的随机序列,事实上随选取的历史资料年限不同有巨大差异,因此该方法灵敏度低。

表 2 用序列实验法评估 2001 ~ 2004 年 6 ~ 9 月增雨效果

	样本数		影响区雨量平均/(mm·d ⁻¹)		作业效果		显著性检验 (秩和检验)
	历史样本 (1991 ~ 2000)	作业样本 (2001 ~ 2004)	历史平均	作业期平均	绝对增雨/ mm	相对增雨/ %	
6 月	106	12	5.745	7.946	2.201	38.31	$\alpha \approx 0.05$
7 月	145	13	10.906	7.573	- 3.33	- 30.56	不显著
8 月	110	6	7.445	13.55	6.105	82.00	$\alpha < 0.05$
9 月	88	6	5.885	5.85	- 0.035	- 0.59	不显著
6 ~ 9 月	449	37	7.836	8.384	0.548	6.99	不显著

2.2 回归分析法

效果的显著性采用 t 检验法,由于 t 检验法要求参加统计的样本服从正态分布。因此将自然雨量进行数学变换,用科尔莫哥洛夫定理进行正态分布

的拟合度检验。经过分析,历史样本的 4 次方根呈正态分布,所以计算过程中所用数据都是所用样本开 4 次方根后的值。回归分析结果见表 3。

表 3 回归分析法评估 2001 ~ 2004 年 6 ~ 9 月增雨效果

	回归方程	相关系数	显著性	绝对增雨/ mm	相对增雨/ %	显著性检验 (t 检验)
6 月	$Y = 0.624 + 0.500x$	0.500	$\alpha < 0.05$	1.302	46.74	$\alpha < 0.005$
7 月	$Y = 0.640 + 0.557x$	0.447	$\alpha < 0.05$	- 0.198	- 4.99	不显著
8 月	$Y = 0.673 + 0.521x$	0.510	$\alpha < 0.05$	3.278	63.37	$\alpha < 0.025$
9 月	$Y = 0.400 + 0.664x$	0.553	$\alpha < 0.05$	1.789	61.69	$\alpha < 0.05$
6 ~ 9 月	$Y = 0.598 + 0.552x$	0.490	$\alpha < 0.05$	1.084	30.68	$\alpha < 0.005$

从表 3 可见两区雨量的相关性较差,7 月份和合计时相关系数小于 0.5。回归分析表明 6、8、9 月平均相对增雨量大于 30%(显著度水平优于 0.05);7 月份相对增雨量 - 4.99%,但不显著;合计统计 37 次作业的平均绝对增雨 1.084 mm/d,相对增雨量 30.68%(显著性水平优于 0.05)。

回归分析法假定作业期参加统计的雨量样本必须是作业区和对比区在同类的天气系统形势下。但

由于样本容量通常较小,加上历史相似天气的选择有很大主观性,所以估计值会有很大波动。

2.3 区域增雨的双比分析法

双比分析结果(表 4)。表明:6、8、9 月平均相对增雨量大于 30%($\alpha < 0.05$);7 月份相对增雨量 - 25.2%,效果不显著($\alpha \approx 0.1$)。合计相对增雨量 20.11%($\alpha < 0.05$)。

表 4 双比分析法评估 2001 ~ 2004 年 6 ~ 9 月综合增雨效果

	作业期雨量平均/ mm		历史雨量平均/ mm		双比值	增雨效果/ %	显著性检验 (秩和检验)
	影响区	对比区	影响区	对比区			
6 月	7.946	4.801	5.745	5.985	1.724	72.4	$\alpha < 0.05$
7 月	7.573	7.954	0.906	8.568	0.748	- 25.2	$\alpha \approx 0.1$
8 月	13.55	9.083	7.445	8.265	1.656	65.6	$\alpha < 0.05$
9 月	5.85	3.975	5.885	5.461	1.366	36.6	$\alpha < 0.05$
6 ~ 9 月	8.384	6.469	7.836	7.263	1.201	20.11	$\alpha < 0.05$

双比分析法需要假定作业期自然雨量在空间分布上是均匀的,但是由于地形条件差异以及作业样本选择时,往往倾向于天气条件有利于作业区等主观偏倚,使得上述假设难以满足。这使得双比分析

法的应用有很大局限性。

2.4 区域回归数值模拟试验方案

2.4.1 分析方法

从历史同期相同天气形势的历史样本 $R_n(x_j,$

y_j) 中随机抽取一个子样 $R_{n1}(x_k, y_k)$ (样本容量与实际作业样本容量一样), 假设为催化作业样本, 余下的样本记作 $R_{n2}(x_t, y_t), t = 1, \dots, T (T = n - k)$, 根据随机化原则从样本 R_{n2} 中随机抽取一组容量为 M 的子样 $R_{n2.1}$, 利用历史回归试验方案, 建立影响区 (y) 和对比区 (x) 的一元回归方程 $y = a + bx$, 给予假定催化作业样本 R_{n1} 一定的作业效果 Q , 即 $R_{n1}[x_k, y_k(1 + 0.05Q)]$, 其中 $Q = 1, 2, \dots, 10$ (即表示给予 0.0%、5.0%、10.0%、...、50.0% 假定作业效果), 求出 R_{n1} 的“增雨效果”, 重复这一过程, 比如进行 n 次, 可得出 n 个增雨效果 $E_{Qi} (i = 1, 2, \dots, n)$, 由此可以得出平均增雨效果 E_Q

$$\overline{E_Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{Qi}$$

取 $Q = 0, 1, 2, \dots, 10$, 重复以上过程, 则得出一组增雨效果 $E (E = 0.05Q)$ 对应的增雨效果统计量均值 $E (E = E_Q)$, 从而建立 E 和的一元线性回归方程:

$$E = -0.020 + 0.988E \tag{1}$$

相关系数 $r = 0.9997, \alpha < 0.001$ 。

从历史样本 $R_n(x_j, y_j)$ 中随机抽取一组容量为 R 的子样建立影响区 (y) 和对比区 (x) 的一元回归方程, 计算 2001 ~ 2004 年 6 ~ 9 月影响区 37 次催化作业增雨效果 E' , 重复此过程 n 次, 最后得到增雨效果 $\overline{E'_n}$ 统计量的均值为 15.53%。将 $\overline{E'_n}$ 代入方程 (1), 得出

$$E = -0.020 + 0.988\overline{E'_n} = 13.37\%$$

算得增雨效果 E 为 13.37%, 效果显著性采用非参量秩和检验得出 $\alpha < 0.001$, 表明催化效果显著。

2.4.2 误差分析

以 ΔE 表示增雨效果 E 与增雨效果的统计量 E_Q 的误差, 则 $\Delta E = E - E_Q$ 。给定增雨效果 E 从 0 ~ 50% 以 5% 的量级线性增加, 则增雨效果的统计量 E_Q 以及增雨效果的误差 ΔE 在表 5 中列出:

表 5 增雨效果的误差分析 %

增雨效果 E	0	5 %	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %
增雨效果统计量 E_Q	2	7.1	12.1	17.2	22.3	27.3	32.4	37.4	42.5	47.6	52.6
误差 ΔE	2	2.1	2.1	2.2	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6	2.6

从表 5 可见, 当增雨效果 E 从 0 增加到 50% 时, 增雨效果统计量 E_Q 从 2% 增加到 52.6%, 两者差异并不大; 增雨效果的误差 ΔE 从 2% 增加到 2.6%, 仅仅增加了 0.6%, 增加幅度很小。表 5 说明, 应用区域回归数值模拟试验方案可以较为客观真实地反映人工催化增雨作业的增雨效果。另外, 从表 5 也可以推算出, 当增雨效率为 13.37% 时 (介于增雨效果 E 的 10% ~ 15% 之间), 其增雨效果的绝对误差 ΔE 为 2.1% ~ 2.2%。

3 结论

(1) 对北京地区 2001 ~ 2004 年 6 ~ 9 月的催化作业效果采用经典统计检验 3 种方法 (序列试验法、回归分析法、双比分析法) 检验, 结果表明: 6 月 8 月增雨效果大于 30%; 9 月份用序列试验法时有负效果, 用其他方法检验时也大于 30%; 7 月份增雨是负效果; 6 ~ 9 月合计的增雨效果用序列试验法、回归分析法、双比分析法评估的结果分别为 6.99% (效

果不显著), 30.68% (效果显著), 20.11% (效果显著)。

(2) 利用统计数值模拟方法通过增雨效果与增雨效果统计量均值关系进行效果分析, 结果表明 37 次催化作业, 每次平均增雨 13.37%, 绝对误差为 2.1% ~ 2.2%, 秩和检验表明增雨效果显著 ($\alpha < 0.001$)。这说明区域回归数值模拟试验方案是一种较为客观的评价方法。

(3) 今后将致力于采用综合评价方法, 把统计检验和对云物理过程的物理检验结合起来, 这样统计结果会更科学, 更令人信服。

参考文献

[1] 曾光平, 郑行照, 方仕珍, 等. 非随机化人工降雨试验效果评价方法研究[J]. 大气科学, 1994, 18(2): 233 - 242.
[2] 曾光平, 方仕珍. 福建省古田水库人工降雨试验效果的多元回归分析[J]. 热带气象, 1986, 2(4): 337 - 342.
[3] 郑淑贞, 何观芳. 积云模式在人工增雨中的应用[J]. 气象, 1999, 25(2): 22 - 27.

Different Methods to Assess Precipitation Stimulation in Beijing Region

Li Shuyan^{1,2,4} Li Wei^{1,3,4} Zhao Xifang⁵

(1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 2 Beijing Climate Center, Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089; 3 Atmospheric Observation Technology Center, CMA, Beijing 100081; 4 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 5 Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089)

Abstract: The sequential analysis method, regression analysis method, double-contrast analysis method and regional regression numerical simulation scheme are adopted to assess 37 precipitation enhancement operations using seeding rockets and seeding artillery from June to September, 2001 to 2004. The comparison between advantage and disadvantage of different methods is made. The results indicate: ① when using the sequential analysis method, the regression analysis method, double-contrast analysis method, and the regional regression numerical simulation scheme, the rain enhancement rates are 6.99%, 30.68%, 20.11%, and 13.37%, respectively. ② The error analysis shows that the absolute errors using the regional regression numerical simulation scheme is 2.1% to 2.2%, so it is a proper method to assess precipitation enhancement effectiveness.

Key words: rain enhancement, sequential analysis, regression analysis, double-contrast method, regional regression numerical simulation scheme, effectiveness assessment