

王婉, 姚展予. 2012. 非随机化人工增雨作业功效数值分析和效果评估 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 855–861, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.22.
Wang Wan, Yao Zhanyu. 2012. Numerical analysis of statistical power in precipitation enhancement experiment in Beijing and estimation of operational cloud seeding effectiveness [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 855–861.

非随机化人工增雨作业功效数值分析和效果评估

王婉^{1,2} 姚展予²

1 天津市人工影响天气办公室, 天津 300074

2 中国气象科学研究院中国气象局云雾物理重点开放实验室, 北京 100081

摘 要 用自然复随机化方法对北京市人工增雨作业非随机化试验进行功效数值分析。结果表明不同统计检验方案功效差别较大, 序列试验功效最差, 当作业样本数较多时对比试验功效较高, 其次为区域历史回归试验和双比分析方案, 当作业样本数较少时区域历史回归试验功效比其他两种方案更高。功效与增雨效果、历史样本数、作业样本数都有关系, 当作业样本数或历史样本数增多时, 功效都会增大, 但是增大的程度会随着样本数目的增多而趋缓。分类统计不一定可以提高检验功效值, 要采用分类统计方案首先就要保证分类后的作业样本数下的功效值大于合并后作业样本数下的功效值。在综合分析影响功效的各种因素基础上选择区域对比试验、双比分析和区域历史回归试验对北京市 2002~2007 年人工增雨作业进行效果总评价, 结果均表明相对增雨效果在 10% 左右, 采用复随机化方案进行显著度检验, 结果表明 3 种方案下显著度水平平均达 0.05。

关键词 人工增雨 统计检验 数值分析 功效

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0855-07

中图分类号 P481

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.22

Numerical Analysis of Statistical Power in Precipitation Enhancement Experiment in Beijing and Estimation of Operational Cloud Seeding Effectiveness

WANG Wan^{1,2} and YAO Zhanyu²

1 Tianjin Weather Modification Office, Tianjin 300074

2 Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification, Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract The naive re-randomization test is used for numerical analysis of the statistical power in a precipitation enhancement experiment in Beijing. The results show that the statistical powers vary depending on the evaluation method; the sequence method provides the worst results. For a large number of samples, the comparison method has the highest statistical power, followed by the historical regression method and double ratio method. For a small number of samples, the historical regression method has a higher statistical power than the other two methods. The statistical power is strongly correlated with the precipitation enhancement effectiveness, historical samples, and operating samples. The statistical power increases with increasing number of historical or operating samples, but the extent of the increase is

收稿日期 2012-08-20 收到, 2012-10-10 收到修定稿

资助项目 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放科研课题 2009004, 天津市气象局科研课题“天津市对流云人工增雨作业物理资料的统计检验方法研究”, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY200806001, 国家重点基础研究发展计划 2010CB95080, 半干旱气候变化教育部重点实验室 (兰州大学) 开放基金

作者简介 王婉, 女, 1981 年出生, 理学硕士, 工程师, 主要从事人工影响天气方面的工作。E-mail: vvan1981@126.com

通讯作者 姚展予, E-mail: yaozy@cma.cma.gov.cn

reduced as the number of units increases. Classification will not always improve the detection efficiency; the statistical power of the post-classification sample size must be greater than that of the combined sample size if the classification method is used. Here, the comparison, double ratio, and historical regression methods are used to evaluate the precipitation enhancement effectiveness in Beijing from 2002 to 2007; the results of all three methods show that the relative effectiveness is about 10% at a significance of 0.05.

Keywords Precipitation enhancement, Statistical evaluation, Numerical analysis, Statistical power

1 引言

人工增雨效果评估的主要困难源于天气特别是降雨的巨大自然变差,播云产生的效果往往小于自然变化引起的起伏变动,要把增雨效果从这些自然噪声中检验出来就变得极为困难,所以对于人工增雨效果检验就不可避免的要求助于统计检验(Dennis, 1980)。人工增雨作业主要分为随机化试验和非随机化试验(李大山等, 2002)。目前国际上科学界普遍接受随机试验后的人工增雨效果统计评估方法,这种方案原则上可以做到符合随机抽样规则,定量的检验出效果并指明其可靠程度,但由于这类试验需要放弃一部分的作业机会,且试验周期长,人们在实践中是难以接受的(叶家东和范蓓芬, 1982)。在抗旱增雨作业中,一般采用非随机化试验方案(德力格尔等, 2002; 李照荣等, 2003; 张国庆等, 2004; 高子毅等, 2005)。非随机化试验是一种事后分析方案,这种事后分析往往给效果评估带来更多的误差来源,所以如何有效、客观、可靠的来评价非随机化作业效果显然更加困难。

随机化试验和非随机化试验有各自适用的统计方案。对于随机化试验,需要在试验前确定统计设计方案,叶家东等(1984)曾就古田随机试验进行功效数值分析,总结了不同统计检验方案在随机化试验中的检验功效。而对于非随机化试验,统计方案要事后确定,只能根据已有数据进行分析来选择合适的统计方法进行效果评估,曾光平和刘俊(1993)针对非随机化试验做了大量的数值分析,指出非随机化试验方案功效、灵敏度、准确度较低,在人工降雨试验中受到限制,然而抗旱增雨作业一般都为非随机化试验,在业务需求的情况下应该如何来选择有效的统计方案来相对准确的进行效果评估,本文将对这一问题进行分析研究。

功效是指一定的试验期内,在一定的显著度上检出一定的试验效果的概率。对功效进行研究可以对试验单元的选取以及统计方案的选择起到指导

性作用。自然复随机化方法(Kemphorne and Dofferler, 1969; Gabriel, 1979; Salvam et al., 1979; Gabriel and Hsu, 1980)的基础是Fisher提出的排列检验或随机化检验,随机化检验是无分布检验方法的一种,此方法具有不需作任何分布假定及相应参数估计、对小样本及样本来自随机及非随机均适用的优点,文章将采用该方法对非随机化试验进行功效数值分析,并在此基础上选择合适统计方案对北京市 2002~2007 年人工增雨作业进行效果总评价。

2 试验方案

2.1 数值分析方案

自然复随机化试验是复随机化试验的简化方案。可以描述为:令所有试验样本数为 N ,其中假定催化样本数(以下也称为作业样本数)为 K ,非催化样本数(以下也称为非作业样本数)为 L 。从 N 中随机抽取 K 个单元按某种统计方案求出效果统计特征值 E ,这样按不同抽样方式抽取 n 次(本文试验将取 n 为10000),可得到 n 个效果统计量 $E_1, E_2, \dots, E_n$ 。将这些统计量值从大到小排列,找出累积频率在 α (显著度)的效果值 E_α 。再次试验,从 N 中随机抽取 K 个单元进行“催化”处理,求出效果统计特征值 e ,如果 e 大于 E_α ,则说明效果显著,这样重复进行 n 次,得到效果显著的比率 P 即为试验功效估计值。

2.2 统计方案

本文将对非随机化试验统计方案中的序列试验、区域对比试验、双比分析和区域历史回归4种方案进行数值分析。设目标区统计变量为 y_i ($i=1, 2, \dots, N$),对比区统计变量为 x_i ($i=1, 2, \dots, N$),催化样本数为 K ($K < N$),非催化样本数为 L ($L < N$),规定催化效果为 θ 。不同统计方案下未作催化处理的效果统计量(E)和催化处理之后的效果统计量(e)分别表示为:

序列试验:

$$E = \frac{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K y_i}{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L y_i}, \quad (1)$$

$$e = \frac{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \theta y_i}{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L y_i}; \quad (2)$$

对比试验:

$$E = \frac{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K y_i}{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x_i}, \quad (3)$$

$$e = \frac{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \theta y_i}{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x_i}; \quad (4)$$

双比分析:

$$E = \left(\frac{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K y_i}{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L y_i} \right) / \left(\frac{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x_i}{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L x_i} \right), \quad (5)$$

$$e = \left(\frac{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \theta y_i}{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L y_i} \right) / \left(\frac{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x_i}{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L x_i} \right); \quad (6)$$

区域历史回归方案:

$$E = \frac{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K y_i}{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (a + bx_i)}, \quad (7)$$

$$e = \frac{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \theta y_i}{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (a + bx_i)}. \quad (8)$$

3 试验数据

根据北京市 2002~2007 年人影作业情况确定目标区, 即图 1 中 A 区, 其中包括 7 个雨量站点: 汤河口、佛爷顶、上甸子、延庆、怀柔、密云和昌平。对比区要求与目标区地形、面积大体相仿, 二者相

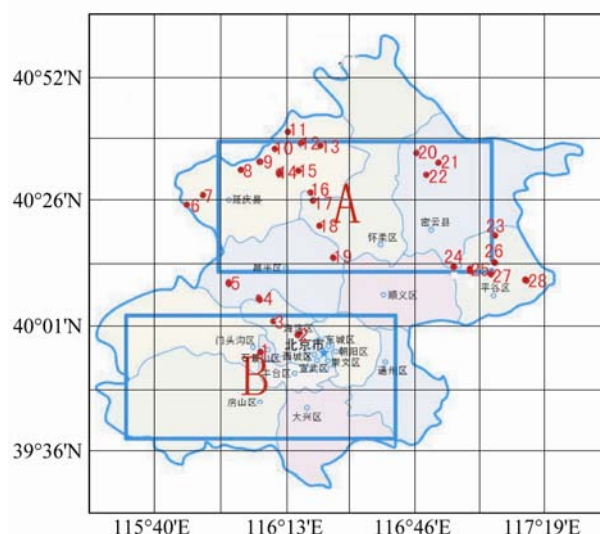


图 1 北京市人工增雨作业目标区和对比区

Fig. 1 Target area and control area of artificial rainfall in Beijing

关系数应该较大且对比区不受催化作业影响。根据这种选取原则选取图 1 中 B 区作为对比区, 其中包括 7 个雨量站点: 西斋堂、霞云岭、门头沟、房山、丰台、大兴和观象台, 面积与目标区相仿, 大致为 $100 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ 。试验数据选取北京市 1980~2000 年 5~9 月所有未作业日降水资料 (北京时间 20:00 至次日 20:00), 分别对目标区和对比区 7 个站点日雨量作平均值处理, 得到 1078 对样本资料, 即 1078 个目标区区域平均日降水资料和 1078 个对应的对比区区域平均日降水资料。

4 功效数值分析

4.1 合并统计功效数值分析

根据北京地区 2006 年和 2007 年人工增雨评估经验, 增雨效果一般在 10%~20%, 因此分别选取 10%、15%、20%、25% 作为“催化效果”来进行非随机化功效数值分析, 对应 θ 分别为 1.1、1.15、1.2、1.25。试验过程: 在 1078 个样本容量中随机抽取 200 个作为非催化样本, 即 $L=200$, 再从剩余样本中随机抽取 50 个作为催化样本, 分别利用公式 (1)、公式 (3)、公式 (5)、公式 (7) 求出未作催化处理的统计特征量 (E), 这样按照不同抽样方式抽取 10000 次进行上述试验, 得到 10000 个 E 值, 将其从大到小排列, 取第 500 个值为 $E_{0.05}$ (0.05 表示显著度水平为 0.05)。再次试验, 取 $L=200$, $K=50$, θ 分别为 1.1、1.15、1.2、1.25, 利用公式 (2)、公式

(4)、公式(6)、公式(8)求出催化处理后的统计特征量(e), 如果 e 大于 $E_{0.05}$, 则说明增雨效果在 0.05 显著度水平上显著, 如此重复进行 10000 次, 得到效果显著的比率 P 为 $L=200$, $K=50$ 时的功效估计值。取 $L=200$, K 分别为 50, 51, 52, ..., 878, 重复上述试验得到一组功效值, 另外分别取 $L=600$ 和 800, K 对应依次为 15 到 478 和 15 到 278, 重复上述试验分别得到对应功效值, 作出功效随催化作业日的变化曲线, 如图 2。

从图 2 中可以看出:

(1) 功效和增雨效果的关系: 和随机化试验一样, 功效随增雨效果的增大而增大。如在区域对比试验中, 当作业样本数为 200 时, 增雨效果 10%、15%、20%和 25%对应的功效值分别为 50%、80%、95%和 98%, 同样当功效值为 80%时, 10%、15%、20%和 25%对应的作业样本数分别为 350、200、150、80。除序列试验之外, 其他 3 种试验功效增大的程度随效果增大而变小, 即当增雨效果分别在较小值和较大值以同样的幅度变动时, 前者功效的变化要大于后者。

(2) 功效和历史样本数的关系: 除对比试验外, 功效和历史样本数有一定关系, 其值都随历史样本的增多而增大。从图 2a、2c、2d 可以看出, 当作业样本数(K)一定, 功效值随着历史样本数(L)的增多而增大, 如双比分析方案中, 当增雨效果为 25%、作业样本数为 200、历史样本数分别为 200、600 和 800 时, 试验功效分别对应为 80%、95%和 98%左右。随着历史样本数的增多, 功效增加的趋势变缓。

(3) 功效和作业样本数的关系: 序列试验、对比试验、双比分析和区域历史回归 4 种方案中, 功效值都随着作业样本数的增多而增大。如区域历史回归试验中, 当增雨效果为 25%、历史样本数为 600 时, 对应作业样本数 50、200 和 400 的试验功效分别大致为 48%、97%和 99%。功效增大的程度随着作业样本数的增加而趋缓, 从图中可以看出, 当作业样本数小于 200 时, 功效增加较快, 当作业样本数由 200 继续增大时, 功效增加变得较为缓慢并且渐趋平稳。

(4) 不同统计方案下功效值变化较大。从图中可以看出, 序列试验功效差。图 3 为不同统计方案下的功效比较图, 4 条曲线分别表示当增雨效果为 25%, 历史样本数为 800 时, 序列试验、区域对比

试验、双比分析和区域历史回归试验 4 种不同统计方案下的功效变化。从图中可以看出, 序列试验功效最差, 要达到 80%的功效值, 所需作业样本数最多, 区域对比试验、双比分析和区域历史回归试验功效情况相当。分析图 3 中不同方案下功效变化曲线, 当作业样本数小于 80 时, 区域历史回归方案的功效高于区域对比方案, 随作业样本数增加, 区域对比试验的功效开始高于区域历史回归方案。因此对于北京市业务性作业而言, 当用日雨量作为统计变量时, 对于较少容量作业样本的统计检验区域历史回归方案更具有优越性, 随作业样本数增加, 区域对比试验的功效更高。

4.2 分层统计功效数值分析

为研究分类统计对功效的影响, 将样本按月份进行分类统计功效研究。

将所有降雨日按月份分层, 5、6、9 月一般为层云降水, 而 7、8 月份多为对流性降水, 所以把 5、6、9 月降雨日和 7、8 月降雨日分别归为一类进行自然复随机化试验。图 4 为不同方案下分类统计功效, 分别表示了当增雨效果为 25%, 历史样本数为 200 时, 在序列试验、对比试验、双比分析和区域历史回归 4 种方案下合并和分类统计功效变化。从图中可以看出, 4 种方案下 7、8 月份功效明显高于合并统计功效和 5、6、9 月份功效值, 而 5、6、9 月份与合并统计功效相当, 变化不大, 比如在作业样本数为 150 时, 4 种方案下 7、8 月份统计功效值比合并统计和 5、6、9 月统计结果平均高出 10 个百分点。上述结论存在一个问题, 即 7、8 月份功效明显高于 5、6、7 月份功效。一般来说, 效果评估大多都是选择较稳定的降水过程进行统计检验的, 这也是目前很多人工增雨统计方案成立的必要前提条件, 而不稳定的强对流天气系统的降水过程一般不满足这个前提条件, 因为这类降水作业区和对比区时空起伏大, 相关性差, 因此, 难以进行效果的统计检验, 然而, 这里计算结果却显示北京地区天气最不稳定的多强对流降水过程的 7、8 月份功效值最高, 对于这一结果可能北京资料仅仅是一个个例, 要得出可信的结论需要更多的资料来进行论证, 因此这一问题有待进一步研究。

上述比较是在合并与分类作业样本数相同的基础上进行的, 而实际情况是对合并样本分类后, 分类样本数与合并样本数是不同的, 那么分类统计是否一定可以提高检验功效呢? 由图 4 可看出, 以

区域历史回归试验为例, 合并样本数为 250 时对应的检验功效为 91% 左右, 假定 250 个样本中有 200 个对流性降水样本和 50 个层云降水样本, 两个分

类检验功效分别为 93% 和 50% 左右, 分类后提高了对流云检验功效但层云降水检验功效却很低, 同样假定 250 个样本中有 150 个对流性降水样本和 100

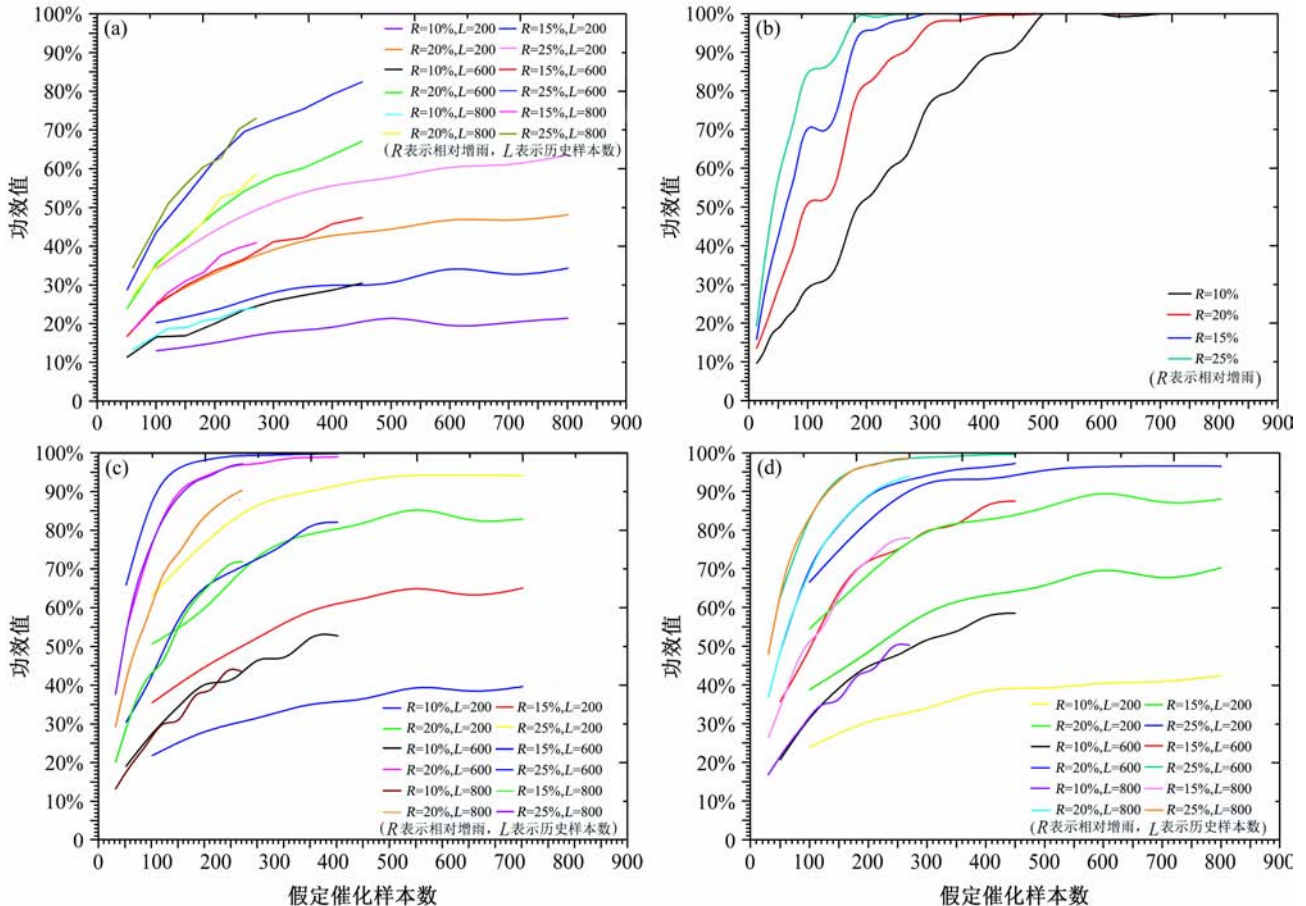


图2 (a) 序列试验、(b) 对比试验、(c) 双比分析和 (d) 区域历史回归方案在不同历史样本数 (L) 下, 0.05 显著性水平上的功效值随作业样本数 (K) 的变化曲线

Fig. 2 The changing of statistical power with the operating sample size (K) on the different historical sample size (L) and 0.05 significance level using (a) sequence method, (b) comparison method, (c) double ratio method, and (d) historical regression method

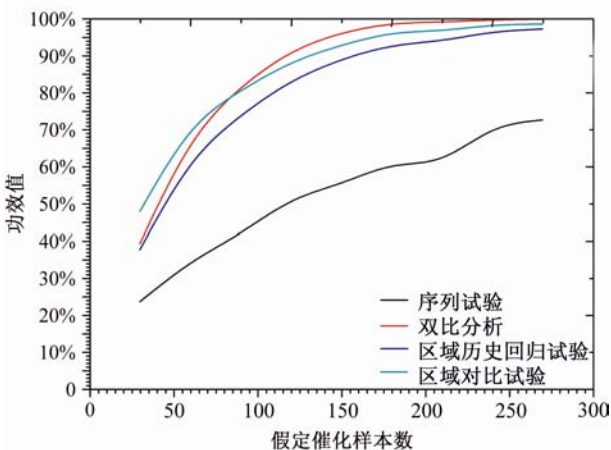


图3 不同统计方案下的功效比较图

Fig. 3 The statistical power comparison of different statistical methods

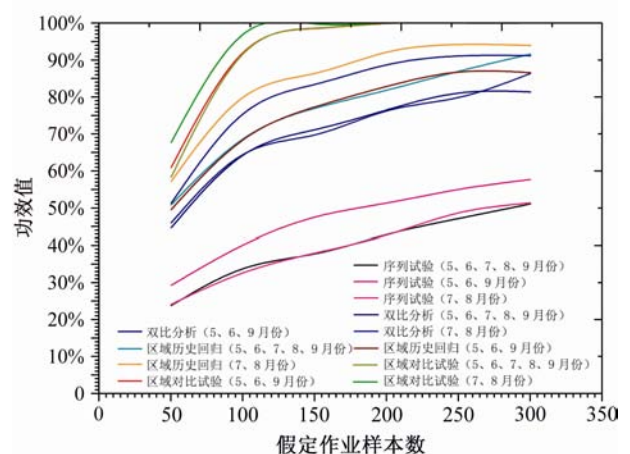


图4 不同方案分类统计功效

Fig. 4 The classified statistical power of different statistical methods

个层云降水样本,两个分类检验功效分别为 87%和 70%左右,分类后使得对流云和层云降水的检验功效都降低了。因此,分类统计不一定可以提高检验功效值,要采用分类统计方案首先就要保证分类后的作业样本数下的功效值大于合并后作业样本数下的功效值。

5 增雨效果评价

5.1 方案选择

以上通过数值分析比较了不同方案下功效的变化,可以看出,功效值和方案本身、历史样本数、作业样本数和样本分层都有关系,因此该如何选择统计方案进行效果检验就要对这些问题综合分析。

北京市 2002~2007 年在北部地区进行了人工催化作业,主要作业方式有飞机、高炮和火箭。以日雨量作为统计变量,共有作业样本 204 个。根据北京市效果评估经验,人工增雨效果一般在 10%到 20%,因此这里采用增雨效果 15%的假定。以历史雨量资料作为总样本,设增雨效果为 15%,在这些历史雨量资料中假定历史样本为 800,得到不同检验方案下功效随假定作业样本数增加的变化,如表 1。从表中可以看出,序列试验检出功效很低,不能作为统计方案进行效果检验,当作业样本数增大到 200 左右时,只有对比试验功效值达到 80%,其次为区域历史回归方案和双比分析方案,在样本数为 210 时,3 种方案的检出功效分别为 82.9%、73.5%和 66.3%,前面分析可知当历史样本增加时,功效随之增大,由于采用 1078 组历史样本对北京 204 个作业样本进行效果检验,历史样本数大于 800,因此 3 种方案的检出功效应该分别大于 82.9%、73.5%和 66.3%,一般来讲,效果检验应该选择功效值达到 80%以上的检验方案,从上述结果可以看出只有对比试验的模拟功效值满足这一条件,但是鉴于大于 73.5%和 66.3%两个功效值与 80%较为接近,下面除选择对比试验之外也选择这两种方案来对北京市人工增雨作业进行效果评估,但由于检出功效低于 80%,因此检验结果可信度相对较差些。

分类统计数值分析表明,分类统计不一定可以提高检验功效值,需要具体情况具体分析。北京市 2002~2007 年共有 204 个作业样本,其中 5、6、9 月份共有 87 个作业样本,即这样分类后作业样本减半。以历史雨量资料作为总样本,计算合并和分

类作业样本在不同作业样本数下的功效值,结果如表 2。从表中可以看出,对于同样的作业样本数,7、8 月份的检出功效明显高于合并统计和 5、6、9 月份功效值,但比较样本数为 100 的 7、8 月份功效值和样本数为 200 时的合并统计功效值,3 种方案中后者功效都要优于前者。因此在该种情况下不适合采用分类统计检验方案。

表 1 功效随假定作业样本数的变化

Table 1 The changing of statistical power with the operating sample size

K	序列试验	对比试验	双比分析	区域历史回归
30	14.39%	21.06%	20.23%	26.47%
60	17.97%	35.87%	32.92%	38.34%
90	23.19%	48.08%	41.83%	49.2%
120	27.67%	55.69%	46.47%	54.46%
150	30.7%	67.71%	55.39%	62.97%
180	32.86%	77.19%	61.95%	69.54%
210	37.27%	82.91%	66.34%	73.5%
240	39.21%	88.2%	70.78%	77.12%
270	40.52%	90.76%	72.04%	78%

表 2 合并和分类统计功效随假定作业样本数的变化

Table 2 Statistical power change on the different operating sample size

K	对比试验			双比分析			区域历史回归		
	合并统计	5、6、7、8 月	9 月	合并统计	5、6、7、8 月	9 月	合并统计	5、6、7、8 月	9 月
50	32.72%	32.63%	39.14%	25.44%	25.15%	29.55%	29.41%	27.78%	34.17%
100	59.13%	56.76%	69.59%	36.14%	33.45%	41.42%	38.21%	36.97%	45.24%
150	75.17%	77.52%	88.16%	39.11%	39.55%	49.41%	42.88%	44.11%	54.01%
200	90.57%	91.45%	97.64%	44.34%	44.15%	56.54%	49.05%	50.38%	60.37%
250	97.33%	97.21%	99.61%	48.31%	48.46%	59.16%	54.67%	53.06%	64.81%
300	99.66%	99.20%	99.87%	55.48%	48.42%	59.22%	60.52%	54.75%	63.53%

以上分析表明可以采用对比试验、双比分析和区域历史回归 3 种方案对北京市 2002~2007 年增雨效果进行总评价。

5.2 效果评估

以上分析表明要对 204 个作业样本在 0.05 的显著性水平上检验出 15%的增雨效果,可分别使用 3 种统计方案:区域对比试验、区域历史回归试验和双比分析方案,其检出功效分别大于 82.9%、73.5%和 66.3%。采用复随机化方案进行显著度检验,表 3 列出了上述 3 种统计方案计算出的北京市 2002~2007 年人工增雨总效果及其显著度检验值,分别为对比试验 8.7%,双比分析 14.4%,区域历史回归方案 11.2%。显著度计算结果表明 3 种统计方

案下的增雨效果显著度水平平均小于 5%，表明增雨效果较为显著。

表 3 北京市 2002~2007 年人工增雨效果和显著度检验
Table 3 Precipitation enhancement effectiveness and significant analysis from 2002 to 2007 in Beijing

	相对增雨	显著度
对比试验	8.7%	0.0096
双比分析	14.4%	0.0274
区域历史回归	11.2%	0.0401

6 总结

(1) 非随机化试验功效数值分析表明不同统计检验方案功效差别较大，序列试验功效较差，当作业样本数较多时对比试验功效较高，其次为区域历史回归试验和双比分析方案，当作业样本较少时区域历史回归试验功效较其他两种方案更高。功效和增雨效果、非作业单元数和作业单元数都有关系，当作业样本数或非作业样本数增多时，功效都会增大，但是增大的程度会随着样本数目的增多而趋缓。

(2) 分类统计不一定可以提高检验功效值，要采用分类统计方案首先就要保证分类后的作业样本数下的功效值大于合并后作业样本数下的功效值。

(3) 在综合分析影响功效的各种因素基础上采用对比试验、双比分析和区域历史回归试验对北京市 2002~2007 年人工增雨作业效果进行总评价，得到相对增雨分别为 8.7%、14.4%和 11.2%，即均在 10%左右。采用复随机化方案进行显著度检验，计算结果表明 3 种方案下显著度水平平均达 0.05，人工增雨效果较为显著。

参考文献 (References)

Dennis A S. 1980. Weather Modification by Cloud Seeding [M]. New York: Academic Press, 267pp.

德力格尔, 黄彦彬, 李仑格. 2002. 青海省东北部地区春季空中水资源潜力分析 [J]. 高原气象, 21 (6): 622-627. De Ligeer, Huang Yanbin, Li

Lunge. 2002. Analyses on potential air water resources over northeast Qinghai in spring [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (6): 622-627.

Gabriel K R. 1979. Some statistical issues in weather experimentation [J]. Comm. Statist. -Theor. Meth., A8 (10): 975-1015.

Gabriel K R, Hsu C F. 1980. Power study of re-randomization test [C]// Third WMO Scientific Conference on Weather Modification. Clermont-Ferrand, France.

高子毅, 张建新, 廖飞佳, 等. 2005. 新疆天山山区人工增雨试验效果评价 [J]. 高原气象, 24 (5): 734-740. Gao Ziyi, Zhang Jianxin, Liao Feijia, et al. 2005. The effect evaluation for precipitation enhancement experiment in Tianshan Mountains of Xinjiang [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (5): 734-740.

Kemphorne O, Doerfler T E. 1969. The behaviour of some significance tests under experimental randomization [J]. Biometrika, 56 (2): 231-248.

李大山, 章澄昌, 许焕斌, 等. 2002. 人工影响天气现状与展望 [M]. 北京: 气象出版社, 325-355. Li Dashan, Zhang Chengchang, Xu Huanbin, et al. 2002. Status and Prospects of Weather Modification (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 325-355.

李照荣, 李荣庆, 李宝梓. 2003. 兰州地区秋季层状云垂直微物理特征分析 [J]. 高原气象, 22 (6): 583-589. Li Zhaorong, Li Rongqing, Li Baozi. 2003. Analyses on vertical microphysical characteristics of Autumn stratiform cloud in Lanzhou region [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22 (6): 583-589.

Salvam A M, Murty A S R, Murty Bh V R. 1979. Numerical simulation of cloud seeding experiments in Maharashtra state, India [J]. Journal of Weather Modification, 11 (1): 116-140.

叶家东, 范蓓芬. 1982. 人工影响天气的统计数学方法 [M]. 北京: 科学出版社, 264-336. Ye Jiadong, Fan Beifen. 1982. Statistic and Mathematical Methods of Weather Modification (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 264-336.

叶家东, 罗幸贫, 曾光平, 等. 1984. 随机试验功效的数值分析 [J]. 气象学报, 42 (1): 69-79. Ye Jiadong, Luo Xingpin, Zeng Guangping, et al. 1984. Numerical analysis of statistical power in randomized precipitation enhancement experiment [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 42 (1): 69-79.

曾光平, 刘俊. 1993. 人工降水试验效果检验的统计模拟方法研究 [J]. 气象学报, 51 (2): 241-247. Zeng Guangping, Liu Jun. 1993. A research on a statistical simulation method for the test of the artificial rainfall effect [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 51 (2): 241-247.

张国庆, 张加昆, 德力格尔. 2004. 夏季黄河上游边界层特征与地面碘化银催化分析 [J]. 高原气象, 23 (5): 684-688. Zhang Guoqing, Zhang Jiakun, De Ligeer. 2004. Analyses on boundary layer characteristics and catalysis conditions of silver iodide on ground in upper reach of Yellow River in summer[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (5): 684-688.