

文章编号: 1673-8411(2019)03-0085-05

# 湖南人工增雨作业效果统计检验与分析

汪玲<sup>1</sup>, 韦增岸<sup>2\*</sup>, 程鹏<sup>2</sup>, 李琼<sup>1</sup>

(1. 湖南省人工影响天气领导小组办公室, 长沙 410000; 2. 广西壮族自治区人工影响天气办公室, 南宁 530022)

**摘要:** 人工增雨作业效果检验手段很多, 而统计检验是较常见的检验手段。以2018年4月湖南郴州增雨作业个例, 采用序列分析、区域对比分析和区域历史回归统计方法等统计检验方法, 对其作业效果进行检验, 从中分析这几种方法的优劣势, 为人工增雨效果统计检验提供依据和参考。

**关键词:** 统计检验; 人工增雨; 湖南

**中图分类号:** P481

**文献标识码:** A

## Statistical Tests and Analysis of Effective Evaluation of Artificial Precipitation Enhancement Operation of Hunan

Wang Ling<sup>1</sup>, Wei Zeng'an<sup>2\*</sup>, Cheng Peng<sup>2</sup>, Li Qiong<sup>1</sup>

(1. Weather modification office of Hunan, Changsha 410000;

2. Weather modification office of Guangxi, Nanning 530022)

**Abstract:** There were several methods of effect evaluation of artificial precipitation operation, and the statistical test was a common one. Hunan Chenzhou precipitation enhancement operation in April 2018 was selected in this paper, statistical test method such as the sequence analysis, regional comparative analysis and historical regression statistical method were applied, the test steps were summarized, the advantages and disadvantages were described, which provided the basis and the reference for artificial precipitation enhancement effect evaluation in details.

**Keywords:** effective evaluation; artificial precipitation operation; Hunan

## 1 引言

人工增雨效果检验方法有多种<sup>[1-3]</sup>, 基于雷达回波等物理检验比较直观, 但只能定性检验; 而统计检验基于一定的数学理论计算评价, 能定量给出作业效果, 适用范围广, 是较有效的人工增雨效果检验手段。本文基于地面气象站降水资料, 研究多种统计检验方法在湖南人工增雨效果检验中的应用。

统计检验方法主要包括序列分析、区域对比分析和区域历史回归统计方法等, 对这几种统计检验方法进行研究, 实现业务化应用, 并对湖南郴州增雨实例展开应用检验, 总结检验步

骤, 分析几种方法使用优劣势, 较系统、较全面地为增雨统计效果检验提供依据和参考。

## 2 资料与方法

搜集1995-2015年21年湖南省97个站点20-20时日雨量数据, 针对作业情况确定影响区和对比区, 再采用序列分析、区域对比分析、区域历史回归统计等统计检验方法检验作业效果。

### 2.1 序列分析

序列分析方法<sup>[4]</sup>假设前提为影响区降雨量在历史上是平稳的时间序列, 所采用的资料以历史

收稿日期: 2019-03-09

基金项目: 湖南省气象局科研课题(XQKJ18B076)、(XQKJ18C013)

作者简介: 汪玲(1989-), 女, 硕士, 工程师, 从事人工影响天气业务研究。

\* 通讯作者: 韦增岸(1986-), 女, 硕士, 工程师, 从事人工影响天气业务研究。E-mail: 272971469@qq.com

雨量资料为主。步骤如下:

(1) 求历史时期影响区降雨量的平均值  $Y_1$ , 以  $Y_1$  为作业期间影响区的自然降水量估计值。由于日雨量的变差较大, 常采用旬、月、季雨量为评估单元。

(2) 计算作业期间影响区实测降水量  $Y_2$ 。

(3) 计算相对增雨量  $O_{SR}$  和相对增雨率  $R_{SR}$ :

$$R_{SR} = \left( \frac{Y_2}{Y_1} - 1 \right) * 100\% \quad (1)$$

## 2.2 区域对比分析

区域对比分析方法<sup>[5]</sup> 假设作业期间自然降水量的空间分布在统计上是均匀的, 所采用的资料是实时降雨资料。步骤如下:

(1) 选取合适的对比区

一般选影响区上方, 面积相等, 雷达回波结构相似, 属同一天气系统的区域为对比区。在传统的对比区选定中, 缺少对影响区、对比区进行相关性检验, 即: 根据影响区和对比区的历史降雨资料, 对影响区和对比区的平均降水量进行相关分析, 当相关系数大于 0.6, 认为影响区和对比区降雨相关, 选定的对比区域具有代表性。步骤为:

I、根据作业时间确定统计单元为日雨量或者小时雨量或者其他, 假设以日雨量为统计单元, 首先, 利用历史降雨资料, 采用区域站点求平均方法计算各区域历史平均日降水量。设影响区和对比区日平均降雨量分别为  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$ ,  $x_i$ ,  $y_i$  为对应区域历史降水量,  $n$  为历史样本数。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3)$$

II、计算影响区和对比区平均日雨量的相关系数  $r$ , 相关系数的大小反映了两区域平均降水量的相关性, 当  $r$  大于 0.6, 认为选择的对比区方案可行。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

(2) 求同期对比区降雨量的平均值  $Y_1$ , 以  $Y_1$  为作业期间影响区的自然降水量估计值。

(3) 计算作业期间影响区实测降水量  $Y_2$ 。

(4) 计算相对增雨量  $O_{AR}$  和相对增雨率  $R_{AR}$ , 公式如下:

$$O_{AR} = Y_2 - Y_1 \quad (5)$$

$$R_{AR} = \left( \frac{Y_2}{Y_1} - 1 \right) * 100\% \quad (6)$$

该方法采用同期对比区的实时降雨资料代替影响区自然降水, 所计算增雨效率多少与对比区的选择关系紧密, 而对比区的选择对地形条件要求较高, 实际中由于地形等多种条件的差异, 假设常常难以完全成立。

## 2.3 区域历史回归统计方法

区域历史回归统计检验技术<sup>[6-8]</sup> 基于地面历史与实时降雨量资料, 采用正态分布理论、最小二乘法理论、 $t$ -检验法等数学理论基础, 计算步骤严密, 可研性强, 适用范围广。基于地面降雨量资料的区域历史回归统计检验方法要求统计变量满足正态分布, 通常情况下, 地面降雨量不满足这个条件, 需要对地面降雨量进行正态变换、正态检验。将服从或近似服从正态分布的代换变量作为新变量, 并建立一元线性回归方程, 计算增雨量, 最后对计算结果进行可信度检验。步骤如下:

(1) 确定影响区与对比区

(2) 统计变量正态变换与正态检验

采用经典的幂指数法, 对降雨数据进行正态变换, 并利用柯尔莫哥洛夫分布函数进行正态检验。

经典的幂变换:

$$y = \begin{cases} x^{\lambda} & \lambda \neq 0 \\ \ln x & \lambda = 0 \end{cases} \quad (7)$$

柯尔莫哥洛夫分布函数对代换变量进行正态检验, 并假定  $n$  个降雨数据为一列一维数据, 设为  $a$ , 具体步骤如下 (中国气象局人工影响天气中心发布的《人工增雨作业效果检验技术指南》(2016 年版)):

I、对数组  $a$  按从小到大的顺序进行排序得到数组  $b$ ;

II、求数组  $b$  的平均值  $\bar{x}$  和标准差  $S$ ;

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

III、求经验分布函数值, 其中  $i$  表示数组  $b$  中数据所对应的序号, 取值 1 到  $n$ ,  $n$  表示总样本数。

$$F_n(x) = \frac{i-1}{n} \quad (9)$$

IV、求理论分布函数, 求  $t_i$ , 再查标准正态分布函数表得到数  $b$  中数据对应的理论分布函数值  $F(x)$ ;

$$t_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (10)$$

$$\text{OHR} = y_2 - y_1 \quad (14)$$

V、求经验分布函数值与对应的理论分布函数值的差的绝对值  $d(x_i)$ :

$$R_{\text{HR}} = \left( \frac{Y_2}{Y_1} - 1 \right) * 100\% \quad (15)$$

$$d(x_i) = | (F_n(x_i) - F(x_i)) | \quad (11)$$

VI、找出  $d(x_i)$  中最大值, 将该值乘以  $\sqrt{n}$ , 记作  $m$ , 比较  $m$  与 1.36 的大小, 当  $m$  小于该值, 认为“统计变量近似服从正态分布”。

(3) 建立一元线性方程

假设对比区雨量  $x_i$  为自变量, 影响区雨量  $y_i$  为因变量, 利用最小二乘法建立两区域雨量的一元线性回归方程  $y = a + bx$ , 系数  $a$ ,  $b$  可以通过下列公式求得, 其中  $S_{xy}$  为对比区、作业区平均降水量的协方差,  $S_x^2$  为对比区平均降水量的方差。注: 建立回归方程所用的是代换变量。

$$b = \frac{S_{xy}}{S_x^2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \quad (12)$$

$$a = \bar{y} - b \bar{x} \quad (13)$$

(4) 计算相对增雨量  $O_{\text{HR}}$  与相对增雨率  $R_{\text{HR}}$ , 需要对代换变量进行逆变换, 得到作业期实际降雨量和估测降雨量。  $y_2$  为  $\bar{y}_k$  的逆变换,  $y_1$  为  $\bar{y}_k$  的逆变换。

(5) 可信度检验

检验统计量  $t$  可通过计算式计算, 计算出  $t$  值之后, 查  $t$ -分布的数值表, 自由度为  $n-2$ , 查表得到的值即表征计算结果的可信度, 值越小说明检验结果可信度越高。

历史雨量: 对比区  $x_i$ , 影响区  $y_i$ ,  $i$  取值  $1 \sim n$ ,  $n$  代表历史期样本数; 对比区历史平均降雨量,  $\bar{x}_n$  影响区历史平均降雨量  $\bar{y}_n$ 。

作业期雨量: 对比区实际平均降雨量  $\bar{x}_k$ , 影响区实际平均降雨量  $\bar{y}_k$ , 影响区估测平均降雨量  $\bar{y}_k$ ,  $k$  代表作业期样本数。

$$t = \frac{\bar{y}_k - \bar{y}_n}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_n)^2 \left[ \frac{1}{k} + \frac{1}{n} + \frac{(\bar{x}_k - \bar{x}_n)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2} \right]}} \quad (16)$$

### 3 作业个例分析

2018 年 4 月下旬, 湖南中部、南部出现了轻—中度干旱。为缓解旱情, 4 月下旬, 郴州市 3 县市区开展了 15 次地面增雨作业, 作业信息如表 1:

表 1 4 月下旬郴州作业情况

序号	作业日期	作业站点	作业方式	用弹量	开始时间	结束时间
1	2018/04/22	苏仙区—山河水库	高炮	10	15:16:00	15:18:00
2	2018/04/22	苏仙区—山河水库	高炮	6	17:20:00	17:21:00
3	2018/04/23	安仁县—永乐江	高炮	6	6:10:00	6:11:00
4	2018/04/23	苏仙区—山河水库	高炮	6	10:33:00	10:34:00
5	2018/04/23	桂阳县—流峰	高炮	34	9:10:00	9:12:00
6	2018/04/23	桂阳县—樟木	高炮	40	9:36:00	9:38:00
7	2018/04/23	桂阳县—银河	高炮	15	10:24:00	10:26:00
8	2018/04/23	桂阳县—洋市	高炮	20	10:35:00	10:37:00
9	2018/04/23	桂阳县—飞仙	高炮	20	10:50:00	10:52:00
10	2018/04/23	桂阳县—古楼	高炮	2	10:52:00	10:53:00
11	2018/04/23	桂阳县—十字	高炮	33	10:20:00	10:22:00
12	2018/04/23	桂阳县—敖泉	高炮	36	9:41:00	9:43:00
13	2018/04/23	桂阳县—方元	高炮	20	12:25:00	12:27:00
14	2018/04/23	桂阳县—燕塘	高炮	4	11:45:00	11:47:00
15	2018/04/23	桂阳县—浩塘	高炮	30	11:47:00	11:51:00

### 3.1 影响区、对比区的确定

选择作业点所在郴州市区、安仁县、桂阳县作为影响区,选择不相邻非影响区的永州市、东安县、双牌县为对比区。

根据作业时间确定统计单元为日雨量,选择1995年-2015年21年4月下旬逐日雨量资料作为历史资料。首先,利用历史降雨资料,采用区域站点求平均方法计算各区域历史平均日降水量,影响区和对比区日平均降雨量分别为 $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ , $x_i$ , $y_i$ 为对应区域历史降水量, $n$ 为历史样本数;最后,计算影响区和对比区平均日雨量的相关系数 $r$ :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (17)$$

### 3.2 序列分析

(1) 求历史时期影响区降雨量的平均值 $y_1$ ,以 $y_1$ 为作业期间影响区的自然降水量估计值。

利用1995年-2015年21年4月下旬逐日雨量求得影响区降雨量的平均值 $y_1$ :

$$y_1 = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 4.8 \quad (18)$$

(2) 计算作业期间影响区实测降水量 $y_2$ ,利用2018年4月下旬逐日雨量求得影响区降雨量的平均值 $y_2$ :

$$y_2 = 5.1 \quad (19)$$

(3) 计算相对增雨量 $O_{SR}$ 和相对增雨率 $R_{SR}$ :

$$O_{SR} = y_2 - y_1 = 0.3 \quad (20)$$

$$R_{SR} = \left( \frac{y_2}{y_1} - 1 \right) * 100\% = 6.25\% \quad (21)$$

序列分析方法检验增雨效果,将历史时期影响区降雨量的平均值作为影响区的自然降雨量,方法简单,在选择不到合适的对比区的时候可以采用,但是由于某一地区的平均降雨量或偏多或偏少,采用该方法计算结果存在一定偏差。

### 3.3 区域对比分析

利用1995年-2015年21年4月下旬逐日雨量统计计算。

(1) 选取合适的对比区。

选取永州市、东安县、双牌县为对比区,计算出相关系数为0.76。

(2) 求同期对比区降雨量的平均值 $y_1$ ,以 $y_1$ 为作业期间影响区的自然降水量估计值;计算作业期间影响区实测降水量 $y_2$ ;计算相对增雨量 $O_{AR}$ 和相对增雨率 $R_{AR}$ ,如表2。

$$O_{AR} = y_2 - y_1 = 0 \quad (22)$$

$$R_{AR} = \left( \frac{y_2}{y_1} - 1 \right) * 100\% = 0\% \quad (23)$$

表2 2018年4月下旬相对增雨量与增雨率计算

日期	$y_1$	$y_2$	$O_{AR}$	$R_{AR}$
2018年4月下旬	5.1	5.1	0	0

采用区域对比分析求出4月下旬郴州增雨作业增加降水为0,并不准确,虽然影响区和对比区降雨相关系数达到0.76,但是在计算时将作业期对比区降雨量视为影响区的自然降水量的估计值,算法本身就存在误差,计算结果只能作为参考之一。所以,还需要用改进的区域历史回归统计方法对作业效果进行进一步检验。

### 3.4 区域历史回归统计方法

(1) 影响区、对比区确定

采用1995年-2015年4月下旬20-20时逐日站点雨量进行统计分析,选择作业点所在郴州市、桂阳县、安仁县为影响区;选择非影响区域内,永州市、双牌县、宁远县作为对比区。首先,剔除无降雨日数,再采用区域站点求平均计算影响区和对比区平均日雨量数据集(后简称数据集),后计算得到影响区和对比区相关系数 $r$ 为0.73。

(2) 正态拟合度检验

对数据集进行2.3次方根变换后,采用柯尔莫哥洛夫分布函数对正态变换后的代换变量数据集进行正态检验, $m$ 值均小于1.36,即数据集符合正态分布,且代换变量数据集中影响区和对比区雨量相关系数此时为0.74,相关性较好。

(3) 最小二乘法建立回归方程

计算得到影响区、对比区 $m$ 值分别为1.15、1.34, $m$ 值均小于1.36,则认为“统计变量近似服从正态分布”,且相关系数为0.74,相关性较好。采用最小二乘法建立回归方程,其中 $x$ 为对比区雨量, $y$ 为影响区雨量:

$$y = 0.52 + 0.72x \quad (24)$$

(4) 绝对增雨量和相对增雨率计算

采用4月22-23日20-20时计算得到影响区、



对比区平均雨量为: 13.4、18.5mm。对对比区雨量进行 2.3 次方根变换, 代入回归方程, 计算得到影响区雨量代换变量为 3.08, 再对其进行逆变换, 得到影响区降雨量为 13.3mm, 计算得到绝对增雨量和相对增雨率如下:

$$O_{HR} = y_2 - y_1 = 0.1 \quad (25)$$

$$R_{HR} = \left( \frac{y_2}{y_1} - 1 \right) * 100\% = 7.52\% \quad (26)$$

#### (5) t 检验

将代换变量进行 t 检验,  $y_k$  取 13.4 的 2.3 次方根, 为 3.09,  $y_k$  为 3.08,  $k$  取 2,  $r$  取 0.74, 计算 t 值:

$$t = \frac{\bar{y}_k - \bar{y}_n}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_n)^2 \left[ \frac{1}{k} + \frac{1}{n} + \frac{(\bar{x}_k - \bar{x}_n)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2} \right]}} = 0.01$$

经过查表得到, 可信度为 0.8 时 t 为 0.253, 可信度差。由 t 检验公式也可以看出, 对于分子偏小的作业即增雨量很小的作业个例, t 检验效果较差。

## 4 总结

增雨效果评估方法多样, 本文采用 2018 年 4 月郴州作业个例应用序列分析、区域对比分析、区域历史回归统计方法分析, 总结这三种方法分析步骤与计算方法, 得出如下结论:

(1) 序列分析简单, 评估结果存在一定误差, 在选择不到合适的对比区时可以选用。

(2) 区域对比分析中, 关键是对比区的选定, 建议考虑两个因素: 关于降水量, 对比区与影响区是否相关; 对比区与影响区是否为同一个降水系统。当选择不到合适的对比区时, 区域对比分

析方法失效。但是, 由于区域对比方法并没有求出影响区与对比区的降雨相关函数, 改进的区域历史回归统计方法更为合理。

(3) 区域历史回归统计方法基于地面历史与实时降雨量资料, 采用正态分布理论、最小二乘法理论、t-检验法等数学理论基础, 数据应用合理、计算分析步骤严明, 可研性强, 适用范围广, 是有效的人工增雨效果检验手段之一, 但是选取的数据集难以同时满足相关性检验、正态检验、t 检验, 且对于增雨量很小的作业个例, t 检验效果较差。

序列分析、区域对比分析、区域历史回归统计方法三种检验方法各有利弊, 人影效果评估至今也是世界科学难题, 如何更有效地评估增雨作业效果, 应结合多种评估手段, 增加科学探测设备, 结合更多观测数据, 从多方面定性、定量评估作业效果。

#### 参考文献:

- [1] 林俊君, 佟伟, 高建秋, 等. 湛江春季一次人工影响天气作业的综合分析 [J]. 气象研究与应用, 2011, 32 (Z2): 81-82.
- [2] 汪玲, 刘黎平. 人工增雨催化区跟踪方法与效果评估指标研究 [J]. 气象, 2015, 41 (1): 84-91.
- [3] 罗远晖, 潘杰丽, 李永平. 钦州市一次火箭人工增雨作业效果分析 [J]. 气象研究与应用, 2013, 34 (2): 60-61, 83.
- [4] 李书严, 李伟, 赵习方. 北京市人工增雨效果评估方法分析 [J]. 气象科技, 2006, 34 (3): 296-300.
- [5] 刘云辉, 郑玉梅, 刘云升, 等. 火箭增雨作业效果评估分析 [J]. 气象科技, 2008, 36 (3): 327-330.
- [6] 王治平, 张中波, 丁岳强, 等. 湖南人工影响天气技术研究与应用 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2011: 261-281.
- [7] 关帅, 赵秀, 孟祥鹏. 规格材抗弯强度分布函数的拟合优度分析 [J]. 林业科技, 2015, 40 (4): 26-28.
- [8] 翟晴飞, 敖雪, 袁健, 等. 基于区域历史回归法的辽宁地区一次人工增雨作业效果检验 [J]. 气象与环境学报, 2017, 33 (6): 96-104.

(上接第71页)

#### 参考文献:

- [1] 黄东林. 桂林市旅游气候舒适度评价 [J]. 气象研究与应用, 2010, 31 (3): 27-29.
- [2] 黄海智, 黄萍. 三亚市旅游气候舒适度评价 [J]. 气象研究与应用, 2010, 31 (4): 70-73, 78.
- [3] 刘文杰. 涠洲岛旅游气候资源分析 [J]. 气象研究与应用, 2012, 33 (S2): 91-92, 94.
- [4] 苏志, 范万新, 李秀存, 等. 涠洲岛旅游气候舒适度评价 [J]. 气象研究与应用, 2012, 33 (2): 27-30.
- [5] 李艳兰, 周美丽. 西江流域旅游气候舒适度的时空变化特征分析 [J]. 气象研究与应用, 2014, 35 (3): 65-70.
- [6] 邓雅倩, 林确略, 彭武坚, 等. 大容山国家森林公园旅游气候舒适度评价 [J]. 气象研究与应用, 2015, 36 (3): 45-49.
- [7] 黎大美, 何珊. 贺州市人居环境气候舒适度特征分析 [J]. 气象研究与应用, 2017, 38 (1): 117-121.
- [8] 党国花, 罗红磊, 周慧僚, 等. 河池市旅游气象服务现状及发展对策研究 [J]. 气象研究与应用, 2017, 38 (2): 69-71+76.
- [9] 严天鹤, 李晓斌, 杨艳军, 等. 漾濞县人居环境气候舒适度评价 [J]. 气象研究与应用, 2018, 39 (3): 60-62.
- [10] GB/T 27963-2011, 人居环境气候舒适度评价 [S].