

张海燕,刘昭武.山东无棣人工增雨效果的统计检验[J].海洋气象学报,2024,44(3):115-121.
ZHANG Haiyan, LIU Zhaowu. Statistical test of effect of artificial rainfall enhancement in Wudi, Shandong[J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(3): 115-121. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20231228001. (in Chinese)

山东无棣人工增雨效果的统计检验

张海燕^{1,2},刘昭武²

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室,山东 济南 250031;2.滨州市气象局,山东 滨州 256612)

摘要 为客观评估无棣增雨作业效果,使用1964—2023年滨州、无棣国家级基本气象站及区域气象观测站4—7月降水资料,采用序列分析、区域回归分析、区域对比分析3种统计检验方法对2014—2023年的人工增雨作业效果进行分析研究。结果表明:(1)4—7月序列分析、区域回归分析的旬平均绝对增雨量分别为7.24 mm、7.89 mm;4、5、7月序列分析通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验,4、7月区域回归分析通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验。(2)区域对比分析的作业日平均绝对增雨量为3.75 mm、平均相对增雨率为21.93%;4、6、7月通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验,5月通过 $\alpha=0.10$ 的显著性水平检验。

关键词 人工增雨;统计检验;序列分析;区域回归分析;区域对比分析

中图分类号: P481 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2024)03-0115-07

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20231228001

Statistical test of effect of artificial rainfall enhancement in Wudi, Shandong

ZHANG Haiyan^{1,2}, LIU Zhaowu²

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Binzhou Meteorological Bureau, Binzhou 256612, China)

Abstract To objectively evaluate the effect of artificial rainfall enhancement in Wudi, Shandong, based on the precipitation data of national basic meteorological stations and regional meteorological observing stations in Binzhou and Wudi between April and July from 1964 to 2023, three statistical test methods, namely sequence analysis, regional regression analysis and regional comparative analysis, are used to analyze the effect of artificial rainfall enhancement from 2014 to 2023. The results are listed as follows. (1) The 10-d average absolute rainfall increase obtained by sequence analysis/regional regression analysis is 7.24/7.89 mm between April and July; the sequence analysis passes the significance test at the level of 0.05 in April, May and July; the regional regression analysis passes the significance test at the level of 0.05 in April and July. (2) The regional comparative analysis shows that the daily average absolute rainfall increase is 3.75 mm and the average relative rainfall increase rate is 21.93%; it passes the significance test at the level of 0.05 in April, June and July, and the level of 0.10 in May.

Keywords artificial rainfall enhancement; statistical test; sequence analysis; regional regression analysis; regional comparative analysis

收稿日期: 2023-12-28; 修回日期: 2024-03-27

基金项目: 山东省气象局科研项目(2020sdqxm21)

第一作者简介: 张海燕, 女, 工程师, 主要从事人工影响天气工作, 410757612@qq.com。

通信作者简介: 刘昭武, 男, 高级工程师, 主要从事人工影响天气工作, lzwbeifeng@126.com。

引言

人工增雨是在适当条件下,通过科技手段对云降水自然过程中的某些环节施加影响,达到增加降水量的目的。地面增雨作业借助高炮、火箭、烟炉等向云中播撒碘化银催化剂,增加云中冰核数量,促进形成较强降水。滨州于1994年开始开展人工增雨作业,至2023年已有30 a,近年来各级地方政府不断加大对人工影响天气(以下简称“人影”)业务的经费投入,各级气象部门也在不断优化作业点布局,抢抓有利时机积极开展增雨作业。社会各方对当地人工增雨效果评估的需求日益增长,客观、定量的效果评估也是推动人影技术高质量发展的有效途径。

以人工增雨抗旱、水库增蓄水为目的的业务性作业一般为非随机化作业,不同于经典的随机化试验,其作业组织、数据收集都受到很多因素限制,因此需探讨适合当地的增雨效果评估方法。人工增雨效果评估包括统计检验和物理检验,统计检验可在一定显著性水平上对增雨效果进行定量分析,是国内外广泛采用的基本方法^[1-4]。国内针对增雨作业效果评估以及相关的检验方法开展了一系列的研究。曾光平等^[5-6]对福建古田水库人工增雨随机试验进行统计分析,得出122次人工催化增雨作业平均相对增雨率为23.8%。冯宏芳等^[7]采用非随机化试验方案开展了蓄水型人工增雨效果检验。钱莉等^[8]采用区域双比、区域回归试验法等对河西走廊东部进行人工增雨效果评估,得出作业日平均相对增雨率为18%~28%,认为区域回归试验方案灵敏度好、功效最高。王婉等^[9]对北京2006年增雨作业效果分析得出地面催化充分作业后的日平均相对增雨率为34%。程鹏等^[10]得出石羊河上游4—10月月平均相对增雨率为17.5%。郭红艳等^[11]、王晓立等^[12]利用区域雨量对比试验对山东济宁、潍坊地区一次降水过程的人工增雨效果进行分析,并改进了作业方案。此文利用滨州滨城和无棣1964—2023年降水量资料,2014—2023年人工增雨作业资料,采用序列分析、区域回归分析、区域对比分析等方法,以无棣为例进行人工增雨效果显著性分析,希望为基层人影作业单位开展增雨效果检验提供一些参考。

1 数据来源

综合考虑研究区域内人影作业点和气象观测站

的分布情况以及资料序列的完整和可靠性,降水量资料选取滨州、无棣国家级基本气象站1964—2023年逐旬降水资料,滨城、无棣国家级基本气象站及区域气象观测站2014—2023年日降水资料,人影作业站点信息由滨州市人工影响天气管理服务中心提供,作业情况来自人影作业点的增雨作业记录。

统计无棣2014—2023年增雨作业情况,以20:00为日界,当日开展增雨作业作为一个作业日。由各月累计增雨作业日数(图1)发现,4月为15 d、5月为7 d、6月为8 d、7月为13 d,因此确定对4—7月开展的增雨作业进行效果评估,作业对比历史期选用1964—1993年尚未开展增雨作业的月份。

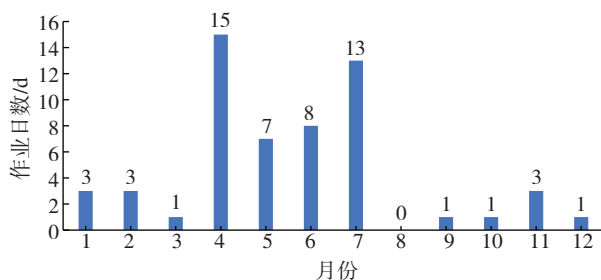


图1 2014—2023年无棣各月累计增雨作业日数
Fig.1 Accumulated number of rainfall enhancement days in Wudi in each month from 2014 to 2023

2 统计分析方法

2.1 序列分析

以作业区历史降水量平均值作为试验期自然降水量的估计值 \bar{x}_2 ,与试验期的降水量实测值 x_1 作比较,得出增雨作业影响的效果值^[13],并进行显著性水平检验。

由于降水量的逐日变差很大,采用旬降水资料^[14],根据公式(1)和(2)可计算出绝对增雨量 ΔR 和相对增雨率 E 。

$$\Delta R = x_1 - \bar{x}_2, \quad (1)$$

$$E = \frac{\Delta R}{\bar{x}_2}. \quad (2)$$

2.2 区域对比分析

假设作业期自然降水量的空间分布在统计上是均匀的,以同期对比区实测降水量作为影响区自然降水量的估计值,与影响区降水量的实测值进行比较,得出增雨作业效果值,并进行显著性水平检验^[4,15-16]。取日降水量为统计的时间单元。

统计作业效果,计算出试验时段对比区自然降水量平均值 \bar{x} ,作为影响区估计降水量值,计算影响区实测降水量平均值 \bar{y} 。则催化效果平均绝对增值 $\Delta\bar{R}$ 和平均相对增值 \bar{E} 的计算公式如下:

$$\Delta\bar{R}=\bar{y}-\bar{x}, \quad (3)$$

$$\bar{E}=\frac{\Delta\bar{R}}{\bar{x}}。 \quad (4)$$

2.3 区域回归分析

区域回归试验通过分析作业影响区和选定对比区的历史降水量的相关性,建立以对比区历史降水量为自变量的回归方程,估算出试验期影响区的自然降水量。通过与影响区降水量实测值进行比较,得到降水量绝对增值 ΔR 和相对增值 E ^[5,17-18]。具体方法如下:

(1)根据作业影响区确定合理的对比区。

(2)统计变量正态检验。对作业影响区和选定对比区的历史降水量进行正态变换,然后利用柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验(K-S检验)进行正态分布的拟合度检验。

(3)区域降水量的相关性分析。根据影响区和对比区历史降水量正态变换数据,求两区对应的相关系数 R ,并进行显著性水平检验(为提高统计结果的准确性,相关系数的显著水平应达0.01)。

(4)建立回归方程,方程显著性水平检验采用F检验。

(5)计算增雨效果。将试验期对比区自然降水

量进行正态变换后作为新变量,代入回归方程求出试验期影响区自然降水量的估计值 \hat{y} ,与作业影响区实测降水量 y 相比较。降水量绝对增值 ΔR 和相对增值 E 的计算公式如下:

$$\Delta R=y-\hat{y}, \quad (5)$$

$$E=\frac{\Delta R}{\hat{y}}。 \quad (6)$$

(6)增雨效果的显著性水平检验。除增雨作业影响外,降水自然变差也会导致降水量绝对增值 ΔR 的变化,因此需对 ΔR 做统计显著性水平检验。

3 人工增雨效果检验结果与分析

3.1 序列分析

无棣地处滨州北部,属温带大陆性季风气候,4—7月影响无棣的天气系统以西风带系统为主,降水系统主要有冷性低涡、副热带高压等^[19]。对无棣国家级基本气象站1964—2023年年降水量及4—7月降水量进行分段分析,以1994年开始人工增雨作业为界,分为1964—1993年、1994—2023年两个时段。1964—1993年降水量呈减少趋势,年降水量变化率为 $-4.82 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,4—7月降水量变化率为 $-0.66 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (图2);开展增雨作业后,1994—2023年降水量呈增长趋势,年降水量变化率为 $7.74 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,4—7月降水量变化率为 $2.84 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (图3)。可见,无棣4—7月降水量满足“试验区自然降水量在时间分布上是平稳的”的假定条件。

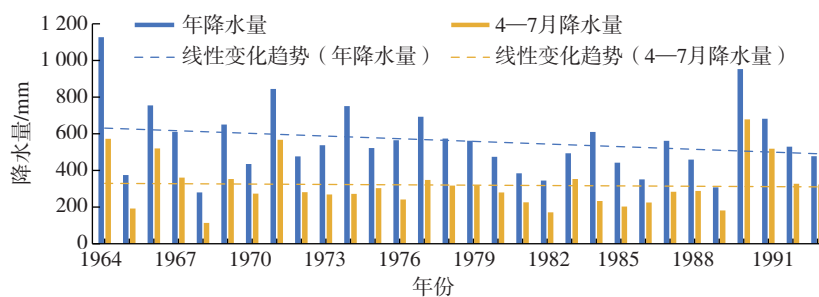


图2 1964—1993年年降水量及4—7月降水量变化

Fig.2 Annual precipitation changes from 1964 to 1993 and monthly precipitation changes from April to July

统计无棣2014—2023年人工增雨作业情况,有作业日的旬即为1个样本,以旬降水量作为统计单元,将1964—1993年无棣站旬平均降水量作为影响区自然降水量的估计值 \bar{x}_2 ,得出与作业期实测降水量 x_1 的差值即作业效果,采用成对样本秩和检验法

进行显著性水平检验^[20]。 Z 表示秩和检验统计量,双侧0.05临界值恒等于1.96, Z 值的绝对值大于1.96,则差异显著; P 表示双侧检验的 P 值,一般取显著性水平 $\alpha=0.05$,要求 $P<0.05$, P 值越小说明差异越显著。表1列出了序列分析检验结果,4—7月

旬绝对增雨量为 $-1.22 \sim 14.77$ mm(6月出现负效果),旬平均绝对增雨量为 7.24 mm,旬平均相对增雨率为 46.35% ;4、5、7月通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验,增雨效果显著;6月增雨效果不显著。

序列分析是唯一不需要选择对比区的统计检验方案,且方法简便。但不同的天气形势或局地气候变化会导致历史平均降水量偏多或偏少,尤其是汛期,采用该方法得出的增雨效果值存在一定偏差^[10]。

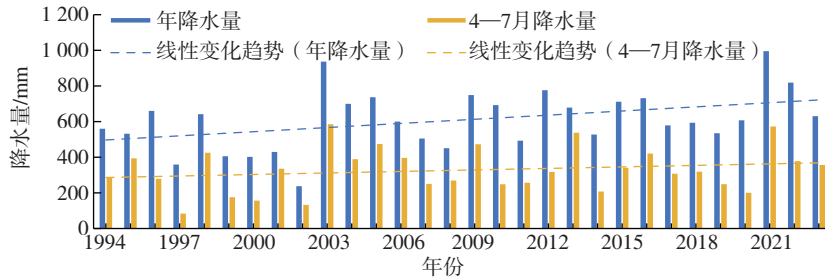


图3 1994—2023年年降水量及4—7月降水量变化

Fig.3 Annual precipitation changes from 1994 to 2023 and monthly precipitation changes from April to July

表1 序列分析检验结果

Table 1 Test results of sequence analysis

月份	估计旬平均雨量 \bar{x}_2/mm	实测旬平均雨量 \bar{x}_1/mm	旬绝对增雨量 $\Delta R/\text{mm}$	旬相对增雨率 $E/\%$	显著性分析	
					Z	P
4	9.36	16.58	7.22	90.15	2.73	0.006
5	10.47	18.65	8.18	72.86	1.99	0.046
6	28.73	27.52	-1.22	-4.24	0.67	0.500
7	34.25	49.02	14.77	26.61	1.99	0.046
平均值	20.70	27.94	7.24	46.35		

3.2 区域回归分析

3.2.1 影响区和对比区选取

4—7月,中纬度西风带中的高空西风槽、低空切变线、黄河气旋等是影响滨州地区降水的主要天气系统,高空引导气流以西—西南气流为主^[21-22]。2014—2023年增雨作业期间,滨城没有进行大规模增雨作业。根据滨州人影作业点分布情况(图4),无棣作为作业影响区时,滨城处于影响区垂直风向的侧面,距离较远,不会受到催化剂污染;且与无棣地形相似、气候特征和天气背景相近,可选为对比区。

3.2.2 统计变量正态变换及区域相关性分析

采用1964—1993年滨州、无棣国家级基本气象站旬降水量作为统计变量 x ,相关性分析要求变量服从或近似服从正态分布。对影响区和对比区的旬降水量进行 \sqrt{x} 、 $\sqrt[3]{x}$ 、 $\sqrt[4]{x}$ 和 $\sqrt[5]{x}$ 的变量变换。经K-S检验选择更接近正态分布的变量变换方式,计算两区相关系数 R ,并进行显著性水平检验。表2列出了影响区和对比区4—7月降水量变换值的正态分布检验值和相关系数。 P 为渐进显著性,当两组正态检验的 P 值均大于0.05,说明这两组数据符合正态分布。相关系数

R 表示两个变量之间直线关系的密切程度,越接近1,则变量间的直线关系越密切;为提高统计结果的准确性,相关系数的显著水平应小于0.01。综合考虑正态拟合优度和区域相关性,确定分析时4月上旬、中旬统计变量取 $\hat{x}=\sqrt[3]{x}$,下旬统计变量取 $\hat{x}=\sqrt[4]{x}$;5月上旬统计变量取 $\hat{x}=\sqrt{x}$,中旬统计变量取 $\hat{x}=\sqrt[3]{x}$,下旬统计变量取 $\hat{x}=\sqrt[5]{x}$;6月上旬、下旬统计变量取 $\hat{x}=\sqrt[3]{x}$,中旬统计变量取 $\hat{x}=\sqrt[5]{x}$;7月上旬统计变量取 $\hat{x}=\sqrt[5]{x}$,中旬统计变量取 $\hat{x}=\sqrt[4]{x}$,下旬统计变量取 $\hat{x}=\sqrt[3]{x}$ 。

3.2.3 建立回归方程

以对比区1964—1993年国家级基本气象站旬降水量正态变换值为自变量,影响区1964—1993年国家级基本气象站旬降水量正态变换值为因变量,建立线性回归方程,显著性水平检验采用F检验法。对比区和影响区旬内均无降水时不作为历史统计样本。图5列出了影响区和对比区4—7月各旬线性回归方程及显著性水平检验结果。各方程均通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验。

3.2.4 增雨效果及显著性水平检验

将作业期滨城实测旬降水量进行正态变换后作

为新变量,代入回归方程求出雨量值,并对其逆变换得到作业期影响区自然降水量的估计值。根据公式(5)和公式(6)计算出降水量绝对对增值 ΔR 和相对对增值 E ,显著性水平检验采用成对样本秩和检验法。

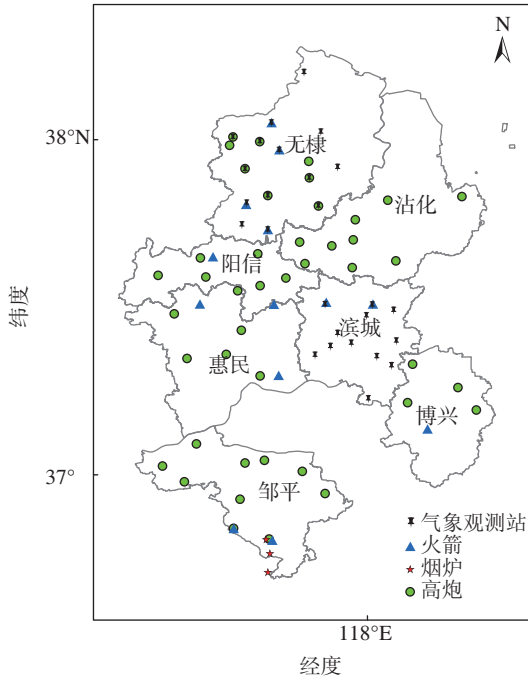


图4 滨州人影作业点分布图

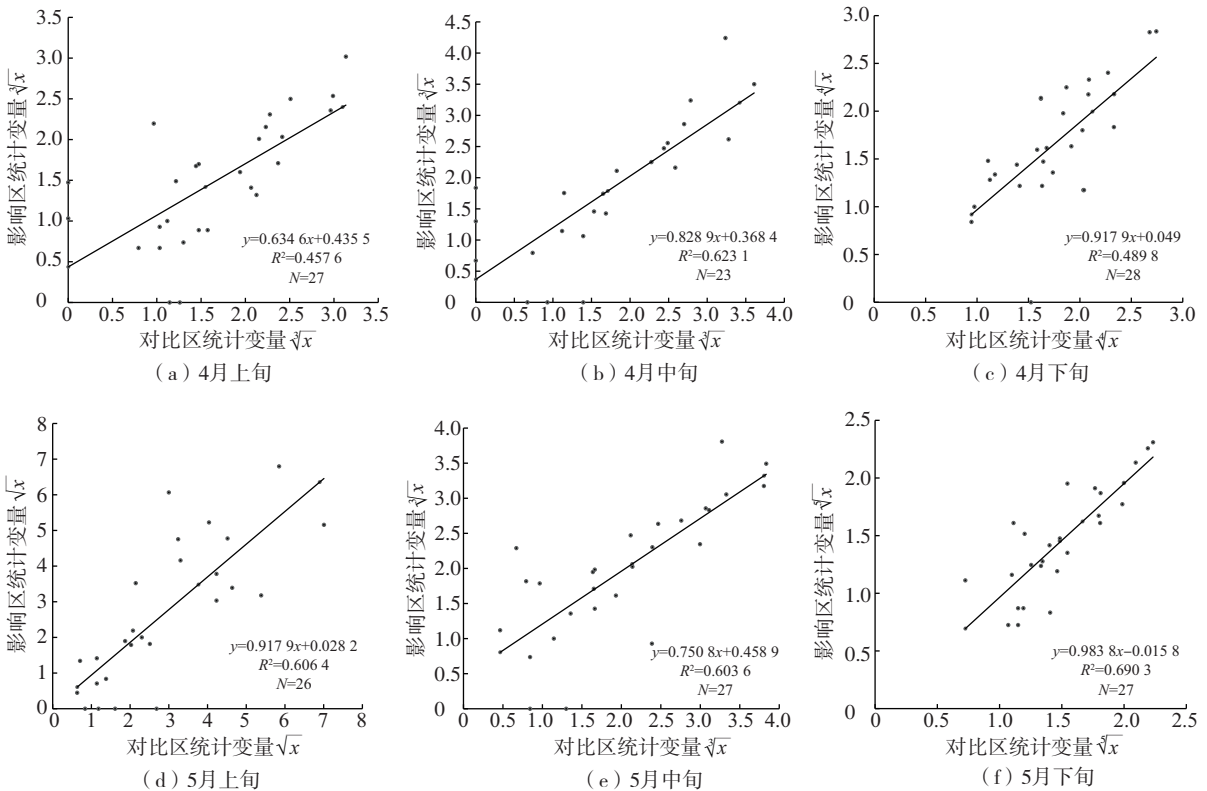
Fig.4 Distribution map of weather modification operation sites in Binzhou

表2 影响区和对比区4—7月降水量变换值的正态分布检验和区域相关系数

Table 2 Normal distribution test and regional correlation coefficient of precipitation transformed values from April to July in target area and contrast area

时间	统计变量	对比区正态检验 P 值	影响区正态检验 P 值	相关系数 R	相关系数显著度
4月上旬	$\sqrt[3]{x}$	0.200	0.200	0.69	<0.001
4月中旬	$\sqrt[3]{x}$	0.200	0.200	0.79	<0.001
4月下旬	$\sqrt[4]{x}$	0.200	0.191	0.70	<0.001
5月上旬	\sqrt{x}	0.200	0.200	0.78	<0.001
5月中旬	$\sqrt[3]{x}$	0.200	0.200	0.78	<0.001
5月下旬	$\sqrt[5]{x}$	0.200	0.200	0.83	<0.001
6月上旬	$\sqrt[3]{x}$	0.138	0.200	0.76	<0.001
6月中旬	$\sqrt[5]{x}$	0.200	0.200	0.62	<0.001
6月下旬	$\sqrt[3]{x}$	0.200	0.200	0.79	<0.001
7月上旬	$\sqrt[5]{x}$	0.200	0.200	0.58	<0.001
7月中旬	$\sqrt[4]{x}$	0.200	0.200	0.73	<0.001
7月下旬	$\sqrt[3]{x}$	0.200	0.200	0.64	<0.001

区域回归分析及检验结果(表3)表明,4—7月旬绝对增雨量为-1.01~22.33 mm(6月出现负效果),旬平均绝对增雨量为7.89 mm,平均相对增雨率为33.22%;4、7月通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验,增雨效果显著,4月旬绝对增雨量为5.73 mm,旬相对增雨率为45.70%;7月旬绝对增雨量为22.33 mm,旬相对增雨率为48.10%。5、6月人工增雨效果不显著。



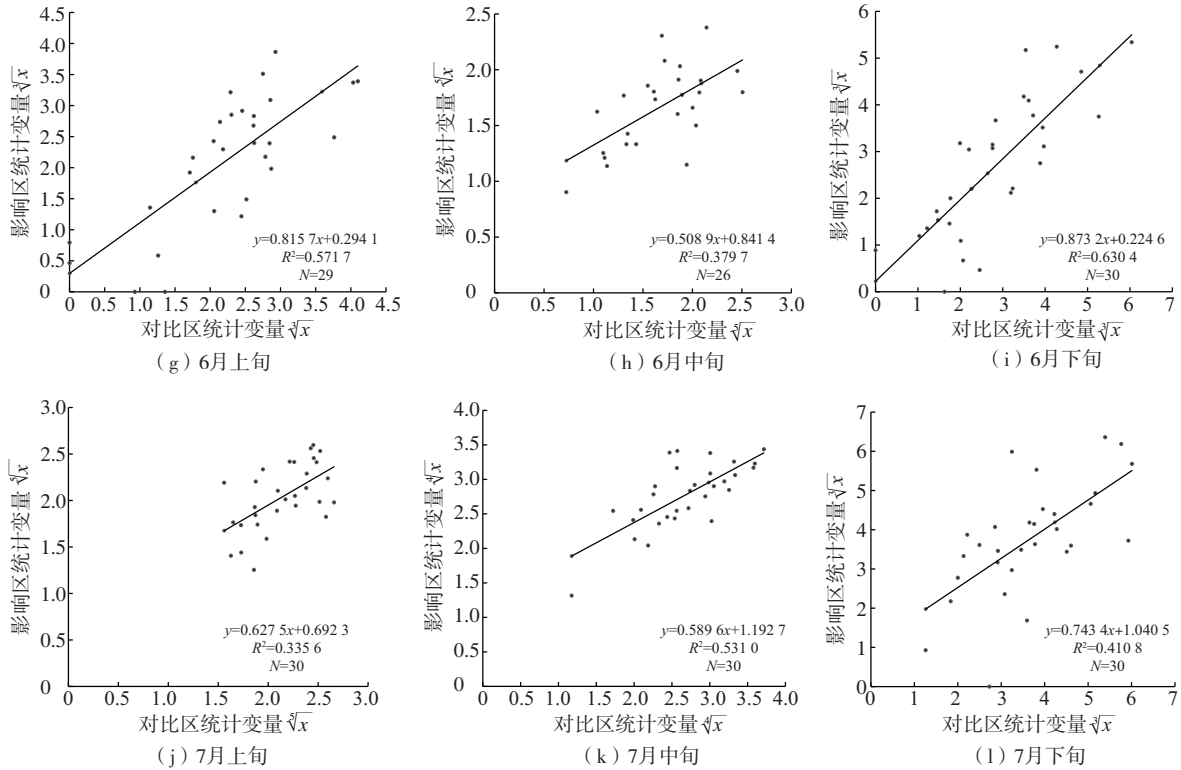


图5 影响区与对比区旬雨量统计变量回归拟合方程

Fig.5 Regression fitting equation of statistical variables of 10-d precipitation in target area and contrast area

3.3 区域对比分析

无棣县域内有 14 个气象观测站,滨城区域内有 12 个气象观测站,分布情况见图 4。统计2014—2023 年 4—7 月无棣、滨城增雨作业日各区域气象观测站平均降水量,以滨城自然降水量平均值作为影响区的估计值,通过比较得出增雨作业效果值,显著性水平检验采用成对样本秩和检验法。表 4 列出了区域对比分析检验结果,4—7 月作业日平均绝对增雨量为 3.75 mm,日平均相对增雨率为 21.93%;4、6、7 月通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验,增雨效果显著,日平均相对增雨率分别为 10.86%、29.95%、38.10%;5 月人工增雨效果通过 $\alpha=0.10$ 的显著性水平检验,日平均相对增雨率为 8.79%。由于不同地区日降水量自然变差较大,尤其是在 6、7 月,个别极值的出现容易对增雨效

果产生较大影响,造成误差。

国内开展的人工增雨试验统计作业效果,如河西走廊东部作业日平均相对增雨率为 18%~28%^[8],北京 2006 年作业日平均相对增雨率为 34%^[9]。无棣 2014—2023 年 4—7 月日平均相对增雨率为 21.93%,具有一定的代表性,表明增雨作业效果比较明显。

表 3 区域回归分析检验结果

Table 3 Test results of regional regression analysis

月份	旬绝对增雨量 $\Delta R/\text{mm}$	旬相对增雨率 $E/\%$	显著性分析	
			Z	P
4	5.73	45.70	2.17	0.030
5	4.52	42.61	1.57	0.116
6	-1.01	-3.53	0.41	0.686
7	22.33	48.10	2.20	0.028
平均值	7.89	33.22		

表 4 区域对比分析检验结果

Table 4 Test results of regional comparative analysis

月份	对比区平均降雨量	影响区平均降雨量	日平均绝对增雨量 $\Delta \bar{R}/\text{mm}$	日平均相对增雨率 $\bar{E}/\%$	显著性分析	
	\bar{x}/mm	\bar{y}/mm			Z	P
4	13.15	14.75	1.60	10.86	2.37	0.018
5	15.10	16.55	1.45	8.79	1.83	0.068
6	8.75	12.49	3.74	29.95	2.20	0.028
7	13.32	21.52	8.20	38.10	2.67	0.008
平均值	12.58	16.33	3.75	21.93		

4 结论与讨论

对于以人工增雨抗旱、水库增蓄水等业务性作业为主的人工增雨效果检验来说,很难像经典的增雨试验一样进行随机化作业并选定作业影响区和对比区,因此采用适合本地的统计检验方法对客观评估增雨作业效果尤为重要。以无棣 2014—2023 年增雨作业为例,通过对比 3 种统计检验方法得出如下结论:

(1)对无棣增雨作业效果的序列分析、区域回归分析以旬雨量为统计单元,得出2014—2023年4—7月的旬平均绝对增雨量分别为7.24 mm、7.89 mm,旬平均相对增雨率分别为46.35%、33.22%。序列分析4、5、7月通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验,区域回归分析4、7月通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验。

(2)以区域平均日雨量为统计单元,采用区域对比分析得出2014—2023年4—7月无棣作业日平均绝对增雨量为3.75 mm、平均相对增雨率为21.93%,其中4、6、7月通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验,5月通过 $\alpha=0.10$ 的显著性水平检验。

序列分析检验方案相对增雨率的计算是以有作业日的旬降水量与历年值之差比历年该旬平均降水量,因此更易受旬内日降水量变差的影响。大量学者通过研究普遍认为,区域回归分析样本容量较大,失真率较小,产生的假效果小,检验功效、准确度较高^[8,23]。中国气象局人工影响天气中心发布的《人工增雨作业效果评估业务指南》推荐在增雨效果检验业务中优先使用区域回归分析。然而,近年来随着各地市人影作业规模不断扩大,覆盖区域越来越广,在效果检验方案设计中很难找到符合要求的对比区。当无法找到符合要求的对比区时,可采用单区序列分析。在统计检验中未考虑降水自然变差和气候变化对评估结果产生的影响,需要进一步改进统计检验方案以使评估结论更科学、更可信。

参考文献:

- [1] 王黎俊,银燕,郭三刚,等.基于气候变化背景下的人工防雹效果统计检验:以青海省东部农业区为例[J].大气科学学报,2012,35(5):524-532.
- [2] 房彬,肖辉,王振会,等.聚类分析在人工增雨效果检验中的应用[J].南京气象学院学报,2005,28(6):739-745.
- [3] 徐冬英,张中波,唐林,等.几种人工增雨效果检验方法分析[J].气象研究与应用,2015,36(1):105-107.
- [4] 李斌,郑博华,兰文杰,等.克拉玛依市冬季飞机人工增雪作业效果统计分析[J].干旱区地理,2018,41(4):686-692.
- [5] 曾光平,方仕珍,肖锋.1975—1986年古田水库人工降雨效果总分析[J].大气科学,1991,15(4):97-108.
- [6] 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.
- [7] 冯宏芳,隋平,蔡英群,等.蓄水型人工增雨效果检验[J].气象科技,2010,38(4):510-514.
- [8] 钱莉,俞亚勋,杨永龙.河西走廊东部人工增雨试验效果评估[J].干旱区研究,2007,24(5):679-685.
- [9] 王婉,姚展予.2006年北京市人工增雨作业效果统计分析[J].高原气象,2009,28(1):195-202.
- [10] 程鹏,沈天成,罗汉,等.石羊河上游地面人工增雨效果统计检验分析[J].干旱区地理,2021,44(4):962-970.
- [11] 郭红艳,李春光,刘强,等.山东济宁地区人工增雨效果检验[J].干旱气象,2014,32(3):454-459.
- [12] 王晓立,马劲松,王恬茹,等.2016-04-16潍坊市人工增雨效果检验分析[J].气象水文海洋仪器,2018,35(1):27-33.
- [13] 李尚成,谢云.人工增雨效果非随机化方法检验及降水气候变化影响的分析[J].甘肃气象,2001,19(4):38-40.
- [14] 王俊.高炮、火箭人工增雨效果统计检验方案设计中的几个问题讨论[J].海洋气象学报,2020,40(4):33-41.
- [15] 樊晓春,丁瑞津,王晓平,等.陇东黄土高原冬春季人工增雪效果分析[J].干旱区研究,2007,24(1):103-107.
- [16] 冯宏芳,郑淑贞,陈敏艳,等.利用人工降水效果统计量评价人工降水效果[J].气象,1999,25(11):40-43.
- [17] 张义,孙根厚,严晓强.基于区域历史回归法的成都地区人工增雨效果检验[J].干旱气象,2022,40(4):640-645.
- [18] 程鹏,陈祺,蒋友严,等.河西走廊石羊河流域近10年人工增雨效果检验评估[J].高原气象,2021,40(4):866-874.
- [19] 杨晓霞,高留喜,宋佳嘉,等.山东夏季强降水的影响系统和物理量特征[J].海洋气象学报,2018,38(3):57-66.
- [20] 王庆,樊明月,张洪生.一次防雹作业过程的效果分析[J].海洋气象学报,2018,38(2):96-102.
- [21] 顾伟宗,陈丽娟.山东夏季降水异常的环流特征及降尺度解释应用预测方法研究[J].海洋气象学报,2019,39(4):83-89.
- [22] 欧阳婧怡,黄菲,许士斌,等.1949—2019年影响山东的热带气旋时空分布及极端降水和大气环流异常[J].海洋气象学报,2021,41(4):1-10.
- [23] 王婉,姚展予.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,2012,17(6):855-861.