

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. [GUO Hongyan, LI Chunguang, LIU Qiang, et al. Effect Testing of Artificial Precipitation Operation in Ji' ning of Shandong Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(3):454-459], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-03-0454

山东济宁地区人工增雨效果检验

郭红艳,李春光,刘 强,张岩岩

(山东省济宁市气象局,山东 济宁 272037)

摘 要:利用国内外普遍应用的区域雨量对比和历史区域回归试验2种增雨效果统计检验方法,分析适用于山东济宁地区人工增雨效果检验的评估方法。运用区域雨量对比试验计算出2次稳定性降水过程增加的降水量,运用历史区域回归试验法计算了2006~2009年济宁地区人工增雨作业的平均增雨量,对2月和4月的增雨效果进行了对比分析。结果表明:效果检验方法的不同导致人工增雨的降水量增加效果差别较大,利用区域雨量对比方法对济宁地区人工增雨效果评估非常实用。

关键词:山东济宁;人工增雨;效果检验

文章编号:1006-7639(2014)-03-0454-06 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-03-0454

中图分类号:P481

文献标识码:A

引 言

干旱灾害是我国乃至全球影响最大的自然灾害之一。干旱对我国农业、水资源、生态环境以及工业和人们的生活均有重要影响,成为制约我国社会进步和经济发展的一个重要因素^[1]。没有水就没有生命,然而与人类生活紧密相关的淡水却越来越匮乏,淡水资源的短缺已成为世界性的危机^[2]。人工增雨是在一定的条件下,通过人工途径对云施加影响,达到增大降水量缓解旱情的科学技术。人工影响天气始于1948年Langmuir和Schaefer的研究工作,他们用粉碎的干冰在云的过冷水层中播撒,产生降雪并形成云中空洞,这一试验令人信服地见到播云的实际效果^[3]。客观、科学、定量地评价人工增雨的催化效果是人工影响天气科学研究中的重要组成部分。对人工增雨的催化效果进行估算及分析,可以了解雨季人工增雨的可能性,以期进一步提高人工增雨作业的科技水平和增雨效果,取得较大的社会、经济效益^[4]。对人工增雨效果的统计检验一般采用随机化试验和非随机化试验^[5]2种方案。随机化试验可以不依赖历史资料,因此在选择目标区时就不受雨量历史资料的限制,并且可以专门设置代表性好

的雨量站网进行观测^[6]。人工增雨抗旱救灾、水库蓄水外场等业务性作业中,均采用非随机化作业方案。非随机化试验通常有序列试验、区域对比试验和历史区域回归试验。

人工增雨是一门理论性和实践性都很强的学科,它的成功与否与天气系统和暖湿气流的配置关系非常密切,与地形、地物及对云的催化部位、催化时机、催化量关系也密切相关^[7]。山东济宁地区很早就开始了人工增雨作业,本文运用区域雨量对比试验计算出2次稳定性降水过程增加的降水量,运用历史区域回归试验法计算了2006~2009年济宁地区人工增雨作业的平均增雨量,并对结果进行分析,归纳出适合济宁地区人工增雨作业的作业时机和天气条件。

1 区域雨量对比试验

区域对比试验是假设试验期雨量的空间分布是均匀的,将对区雨量作为影响区自然雨量的估算值^[8]。根据人工增雨作业前后催化参数计算及降水情况,利用济南雷达站回波计算分析作业前后降水情况,在影响区上游选择一个相当面积的区域作为对比区,通过基于催化剂在50 min内有效的计算,得出影响区平均降水量、对比区平均降水量、降

收稿日期:2013-05-16;改回日期:2013-11-28

基金项目:中国气象局公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY201106010)资助

作者简介:郭红艳(1976-),女,山东汶上县人,理学硕士,工程师,从事管理、应用气象、人工影响天气研究。E-mail:jnqxj001@sina.com

水增加相对值,再通过雷达回波特征,跟踪不同时段
的回波强度变化,从而计算出所增加的降水量,分析
增雨效果。

1.1 2007年6月19日催化试验

监测目标云系,选择适宜人工影响的云中区域,
实施有针对性的催化是取得人工增雨良好效果的前
提^[9]。2007年6月19日20时,500 hPa 高度上贝
加尔湖东部有一低涡,山东济宁地区受西南气流影
响,孟加拉湾水汽沿着该通道北上进入山东地区,高
空槽主体在山东省北部;700 hPa 上从华南到鲁东
南为一致的西南气流,未形成低空急流,黄河北有切
变线,山东济宁地区处于切变线南侧(图1);地面图
上济宁市处在倒槽顶端(图2)。

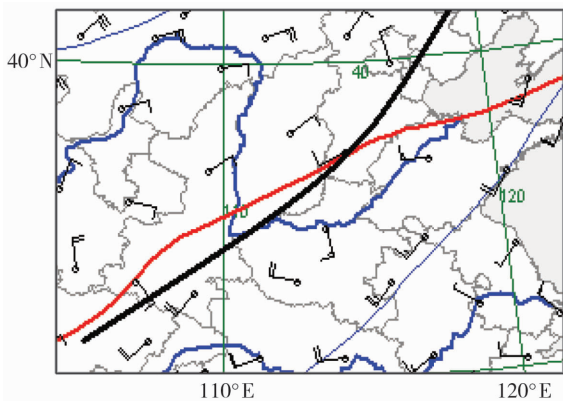


图1 2007年6月19日20时700 hPa 形势图
Fig.1 The 700 hPa situation at 20:00 June 19, 2007

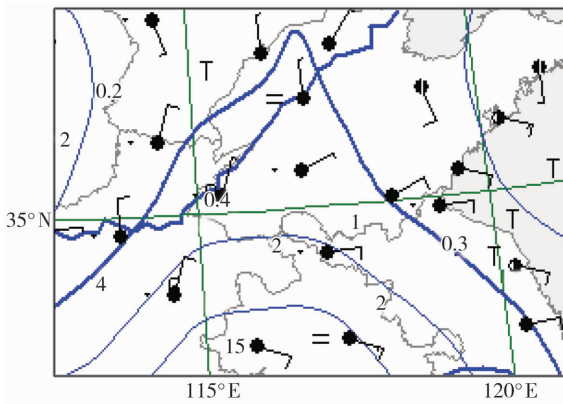


图2 2007年6月19日20时地面图
Fig.2 The surface situation at 20:00 June 19, 2007

目标区应选开展过人工增雨的区域。对比区根
据以下原则选择:不受催化影响,人工增雨作业区
的高空风、盛行风的上风方或侧风方;地形、面积与
作业区大体相似,在同一主区或副区的站点;试验期
对比区与作业区所受的天气系统相同,雨型相似,样

本相关系数的显著性水平应达到0.01以上。针对
以上原则,可以选取作业区同区的其他未作业的区域
作为对比区,若同区域的其他站点也有作业,则选
取较为临近的未作业的区域作为对比区。

2007年6月19日催化试验选择曲阜市内的5
个站点(时庄、书院、中册、高峪、柘沟)作为目标区,
在目标区上游选择一个相当面积的区域作为对比区,
对比区选在兖州市内的6站点(兖州、新兖、兴
隆庄、大安、颜店、黄屯),兖州市内没有进行人工
增雨作业。

6月19日22:08,在曲阜火箭发射点利用WR
-98型增雨火箭向西方向对云层中部进行人工催
化作业。一枚WR-98型火箭弹含碘化银33.3g,
在-10℃时碘化银的成核率为 1.8×10^{15} 个/g。作
业仰角为65°,扇面为22.5°,发射方向为西。根据
《WR-98增雨防雹火箭焰剂播撒范围表》可查出发
射后开始播撒距离为2.01km,水平播撒距离为4.
74km,播撒最高高度6.43km。

根据探空资料,当日20时500 hPa(高度5.86
km)温度-4℃,400 hPa(高度7.58 km)温度-14
℃,通过内插法可以计算出播撒最高点温度为-7.3
℃,计算出0℃层在5.17 km。考虑到稳定性降水
上升气流较弱,催化剂主要在0℃层以上有效。研
究表明,天气条件、气流、风切变、大气热力动力状
况对催化剂的输送扩散产生影响,播云线的扩散速
率一般为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[10]。图3是本次增雨作业的垂
直剖面示意图,通过图3可计算出催化剂有效播撒
在离开发射点3.0 km以后,有效播撒距离为3.66
km,计算出扩散角度为8.8°。

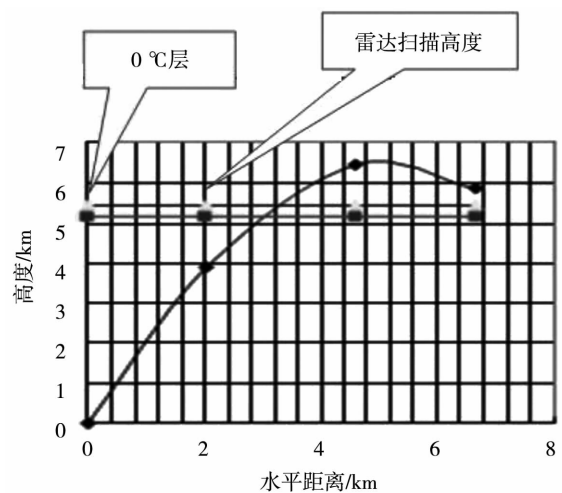


图3 WR-98火箭弹运行轨迹示意图
Fig.3 The trajectory diagram of WR-98 Rocket shell

发射点距离济南雷达站 130 km,当济南雷达仰角分别为 0.5° 、 1.5° 、 2.4° 、 3.4° 时,在曲阜发射点扫描高度分别为:1.13 km、3.40 km、5.44 km、7.7 km,考虑到稳定性降水上升气流较弱,取济南雷达站仰角为 2.4° 的雷达回波进行计算分析,扫描高度位于 0°C 层以上 270 m 处。

根据济南多普勒雷达回波移动可计算出发射点上空 5.44 km 高度上回波移动方向为 62° ,移速为 47 km/h。从火箭催化剂播撒结束点到受影响区最远站(中册站)为 38 km。根据降水回波移动速度,计算催化剂后部达中册站的时间为 48 min,所以取作业后 50 min 降水量进行分析。图 4 为人工催化过程示意图及发射后 50 min 发射点周围降水情况。

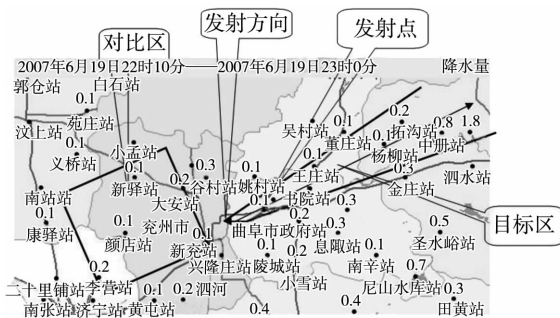


图 4 人工催化过程示意图及发射后 50 min 发射点周围降水(单位:mm)

Fig. 4 The schematic figure of artificial catalyzing process at 22:08 June 19, 2007 and the precipitation distribution nearby the launching site in 50 minutes after launching

降水增加量的计算是基于催化剂在 50 min 内有效。影响区平均降水量: $A = (0.1 + 0.1 + 0.1 + 0.2 + 0.8)/5 = 0.26 \text{ mm}$;对比区平均降水量: $B = (0.1 + 0.0 + 0.2 + 0.3 + 0.1 + 0.1)/6 = 0.13 \text{ mm}$;本次人工影响天气过程增加降水相对值: $(A - B)/B * 100\% = (0.26 - 0.13)/0.13 * 100\% = 100\%$ 。影响区面积 = 作用距离 \times 扩散距离 = $VT \times ST = VST^2 = 47 \times 3.6 \times 0.81 \times 0.81 = 110.6 \text{ km}^2$,式中 V 为播撒后催化剂移动速度(km/h), S 为催化剂扩散速度(km/h), T 为催化剂在有效区域内的停留时间(h)。增加降水:影响区面积 $\times (A - B) \times 10^3 = 1.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。从上述计算可以得出济宁地区 2007 年 6 月 19 日人工增雨目标区比对比区增雨 140 000 m^3 。

1.2 2007 年 3 月 3 日催化试验

2007 年 3 月 3 日 20 时,500 hPa(图略)东西伯利亚上空有一较强大冷涡存在,冷中心最低气温 -48°C ,伴有高空槽,冷空气沿着槽后西北气流南下;

巴尔喀什湖一带为一阻塞形势,冷空气沿着阻塞系统北侧的西北气流不断补充到切断低涡中,阻塞形势稳定存在;从我国河套到贵州北部为一比较深厚的高空槽,槽后冷平流比较明显,北方南下的冷空气不断补充,高空槽呈加深发展趋势,在温压场配置上,温度槽落后于高度槽,我国中东部大部地区处在槽前西南气流中。700 hPa(图略)在巴尔喀什湖和东西伯利亚上的系统与 500 hPa 形势相对应,分别为一稳定的阻塞形势和较强冷涡并伴有高空槽,冷中心的最低气温达 -36°C ,位置与 500 hPa 的冷中心位置基本相同,均在贝加尔湖以北;500 hPa 上河套到贵州北部的高空槽在 700 hPa 上表现为闭合低涡,并有冷暖切变与之并存,低涡中心在山西北部,较 500 hPa 有所偏前,系统高低配置呈后倾,在冷切前、暖切后是大范围的西南急流区,覆盖了我国东南部大部地区,济宁地区处在该西南急流区中。从天气形势的综合分析来看,济宁地区上空有较强的上升运动和明显的水汽辐合,强盛的西南气流提供了充足的水汽供应。

由于 2007 年 3 月 3 日降水过程高空风向偏南分量较多,催化试验选择邹城站点作为目标区。邹城站点位于济宁地区东部,地处 $116^\circ44'30''\text{E} \sim 117^\circ28'54''\text{E}$, $35^\circ9'12''\text{N} \sim 35^\circ32'54''\text{N}$ 。地貌景观复杂多样,其地势东高西低、北高南低,总面积 1 613 km^2 。对比区选在嘉祥、金乡、鱼台、济宁、微山 5 个站点,这些站点境内没有进行人工增雨作业。

3 月 3 日 16:23,在邹城西外环火箭发射点发射 5 枚 BL-1A 型人工增雨火箭弹,一枚火箭弹含碘化银 10.5 g,碘化银的成核率为 1.8×10^{15} 个/g,这次催化试验碘化银催化剂量为 52.5 g。邹城市被西南气流控制,催化剂移动的下游方向是发射点的东北方向。

由于本次降水过程高空风向偏南分量较多,作业后对比区和目标区雨量情况如图 5。对比区平均雨量为: $(7.2 + 10.0 + 10.5 + 4.3 + 8.4)/5 = 8.08 \text{ mm}$;邹城市降雨量为 12.4 mm,绝对增雨量 = $12.4 - 8.08 = 4.32 \text{ mm}$ 。通过上述个例作业条件分析,说明作业时作业区受西南气流控制,增雨量明显。

2 历史区域回归试验

历史区域回归试验是利用对比区自然降水量作为预报因子,对试验期目标区自然降水量进行统计推断^[11]。它基于 1 个或者 1 个以上的对比区,运用 2006 ~ 2009 年济宁市人工增雨作业月平均增雨量,按历史资料建立目标区与对比区的自然降水量回归

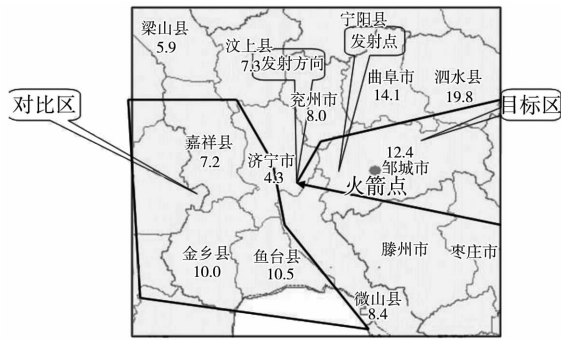


图5 2007年3月3日20时至4日08时
济宁市降水量分布(单位:mm)

Fig.5 The rainfall distribution in Ji'ning from 20:00
March 3 to 08:00 March 4, 2007 (Unit:mm)

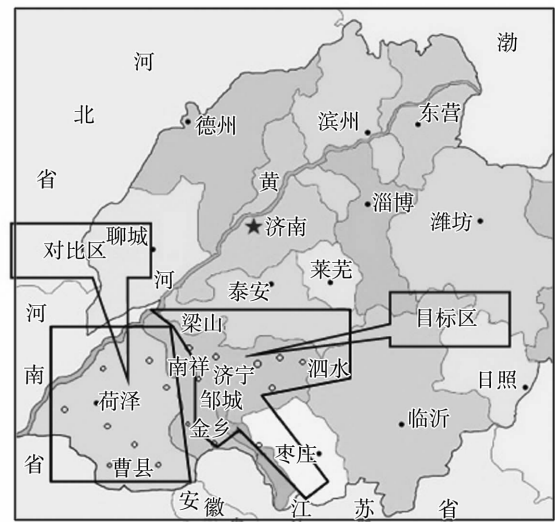


图6 对比区与目标区位置示意图

Fig.6 The sketch map for the contrast area and target zone

方程, 据此以试验期对比区自然降水量估计目标区的自然降水量。

2.1 目标区和对比区选择

目标区为济宁市及下属县区(嘉祥、金乡、梁山、邹城、泗水)。济宁地区位于山东省西南部, 属暖温带大陆性季风气候区, 土地总面积 10 684.9 km², 全市地形以平原洼地为主, 有 11 个大气监测站, 138 个区域自动观测站, 设有 12 个火箭点。

对比区设置: 选在目标区的上风方或垂直于风向的侧面, 不受催化作业影响。其地形、面积与目标区大体相仿, 主要是为了减少地形对降雨量的影响。试验期目标区与对比区所受的天气系统相同, 雨型类似, 反映在雨量上就是对比区的雨量与目标区的雨量密切相关, 样本相关系数的显著性水平应该达到 0.01 以上。对比区和目标区都应该有较稠密的雨量测站^[4]。根据以上条件, 选择西南方向与济宁相邻的菏泽市及下属的曹县为对比区。目标区与对比区的位置如图 6 所示。

济宁市在中纬度西风气流的控制下, 主要天气系统与偏西风相配合, 菏泽市处于目标区的上风方向或者垂直于风向的侧面。对比区与目标区同样以

平原为主, 总面积约 12 238.6 km², 辖区内有 9 个大气监测站和 46 个区域自动观测站。

2.2 历史回归试验法计算月平均增雨量

2006~2009 年 2 月和 4 月是济宁地区增雨作业次数相对较多的月份, 分别进行了 30 和 11 次作业。采用历史区域回归试验法分别计算 2、4 月份的月人工增雨效果。2006~2009 年济宁市进行人工增雨试验期间, 菏泽市没有进行大规模的增雨作业。此次试验采用 1971~2000 年 30 a 菏泽市和济宁市 2、4 月大气监测站的月雨量资料, 取其算术平均值作为菏泽市和济宁市的月雨量, 建立目标区和对比区区域雨量回归方程。将 2006~2009 年的 4 个年份看作 4 次试验取平均效果, 运用多个事件检验法检验多次试验的总效果。计算结果列于表 1、表 2 中, 其中 n 是试验期目标区作业次数, r 是对比区和作业区历史月雨量的相关系数, E 是绝对增雨效果, R 是相对增雨效果, α 是增雨效果的显著性, x^- 和 y^- 分别是对比区和目标区月雨量的对数值^[4]。

表 1 2006~2009 年 2 月济宁地区人工增雨试验回归分析结果

Tab.1 The regression analysis results of artificial rainfall enhancing test in February from 2006 to 2009 in Ji'ning region

目标区	对比区	n	R	回归方程	$E/\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	$R/\%$	α
济宁市	菏泽市	30	0.8122	$y^- = 0.0237 + 0.8463 x^-$	5.23	9.2	<0.2
嘉祥县		6	0.6348	$y^- = -0.3124 + 0.9748 x^-$	6.71	13.6	0.1
金乡县	曹县	6	0.6544	$y^- = -0.4227 + 1.0108 x^-$	7.95	12.7	0.05
邹城市		7	0.6812	$y^- = -0.5217 + 0.8312 x^-$	6.37	11.9	0.1
泗水县		6	0.5946	$y^- = -0.9342 + 0.4362 x^-$	7.11	13.2	0.1

表 2 2006~2009 年 4 月济宁地区人工增雨试验回归分析结果

Tab. 2 The regression analysis results of artificial rainfall enhancing test in April from 2006 to 2009 in Ji'ning region

目标区	对比区	<i>n</i>	<i>R</i>	回归方程	<i>E/mm · m⁻¹</i>	<i>R/%</i>	α
济宁市	菏泽市	11	0.7412	$\hat{y} = 0.1923 + 0.8425 x$	12.44	10.7	<0.2
嘉祥县		8	0.5733	$\hat{y} = -0.1527 + 0.9748 x$	14.03	11.8	0.1
金乡县	曹县	7	0.7664	$\hat{y} = -0.3706 + 1.0108 x$	11.07	10.3	0.2
邹城市		5	0.7453	$\hat{y} = -0.2108 + 0.8312 x$	10.38	8.4	0.1
泗水县		6	0.6723	$\hat{y} = -0.3125 + 0.945 x$	16.05	12.8	0.05

区域雨量相关系数在 0.57~0.81 之间, 相关系数的显著性 $\alpha < 0.2$ 。回归方程都是显著的, 可信度达到 99% 以上。2 月的绝对增雨量为 5.23~7.95 mm, 4 月的绝对增雨量为 11.07~16.05 mm, 4 月的绝对增雨量明显大于 2 月。分析原因认为, 西太平洋副热带高压 2 月在 15°N 以南, 面积最小, 影响较小, 到了 4 月, 西太平洋副热带高压接近 15°N, 副高强度和范围均有所增加^[11]。4 月的济宁市更靠近副高的西北部, 由于副高西北侧从西南和东南方向来的低空暖湿气流, 输送来自孟加拉湾到南海一带的暖湿空气, 低层的暖湿平流造成了气层的位势不稳定, 水汽通过边界层在副高西北侧辐合。充足的水汽供应, 深厚的上升运动, 不稳定的大气层结和有利的系统配置, 为济宁市 4 月的人工增雨作业的实施及其催化效果的提高提供了有利的条件。

3 小 结

人工增雨效果检验一直是个世界性的难题。为了解决这一问题, 山东省开展了飞机、高炮、火箭人工增雨作业, 及时地评估和上报高炮(火箭)人工增雨效果已成为各地市、各县级气象部门的日常业务。但作为基层人影部门, 由于专业人员少, 且在无评估规范可循的情况下, 要在短期内完成对作业效果的客观评估并非易事。本文通过区域雨量对比试验和历史区域回归试验 2 种检验方法分析, 对于济宁地区人工增雨作业来说, 选择云层厚的层状云稳定性降水的人工增雨效果试验增雨幅度结果较大。出现这种结果的主要原因是: 此次用来进行定量评估的雨量是过程雨量, 而非火箭作业期间的“时段雨

量”, 因而其结果是偏大的, 但在当时条件下, 作为基层人影作业的单位, 所做的是抗旱增雨作业, 而不是科研单位进行的增雨实验, 要像“经典”的增雨实验那样进行作业并取得各种数据不是他们的人力和财力所能办到的, 因此只能用过程雨量来进行评估。现在, 有了自动气象站的降水记录, 可以选取作业时段的降水量来进行评估, 其评估结果将更具客观性、可信性。

参考文献:

- [1] 李维京, 赵振国, 李想, 等. 中国北方干旱的气候特征及其成因的初步研究[J]. 干旱气象, 2003, 21(4): 1-5.
- [2] 张良, 王式功, 尚可政, 等. 中国人工增雨研究进展[J]. 干旱气象, 2006, 24(4): 73-81.
- [3] Roland List. 人工影响天气—未来的景象[J]. 干旱气象, 2004, 22(3): 83-89.
- [4] 郭宇光, 王以琳, 盛立芳, 等. 聊城市人工增雨效果统计方法及计算结果分析[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(1): 19-25.
- [5] 曾光平, 郑行照, 方仕珍, 等. 非随机化人工增雨试验效果评价方法研究[J]. 大气科学, 1994, 18(2): 233-242.
- [6] 叶家东, 程克明, 曾光平. 闽中雨季区域雨量统计特征及人工影响的效果[J]. 气象学报, 1981, 39(4): 474-482.
- [7] 渠永兴, 滕水昌, 蔡元成, 等. 火箭人工增雨作业的个例分析[J]. 干旱气象, 2006, 24(2): 33-38.
- [8] 孙旭映, 王劲松, 王静. 火箭增雨效果雷达回波分析[J]. 干旱气象, 2005, 23(3): 39-41.
- [9] 金华, 何晖, 张蕾. 一次对流性降水过程中人工催化部位的选择[J]. 干旱气象, 2008, 26(1): 52-56.
- [10] 余兴, 徐小红, 戴进, 等. 层状云播云催化剂输送扩散数值模拟的客观比较[A]. 中国气象学会 2004 年年会论文集[C]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [11] 章澄昌. 人工影响天气概论[M]. 北京: 气象出版社, 1992.

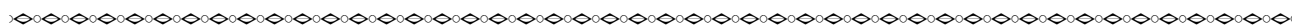
Effect Testing of Artificial Precipitation Operation in Ji' ning of Shandong Province

GUO Hongyan, LI Chunguang, LIU Qiang, ZHANG Yanyan

(*Ji' ning Meteorological Bureau of Shandong Province, Ji' ning 272037, China*)

Abstract: By using two kinds of methods such as the regional rainfall comparison test and the regional historical regression test, the effect testing method which was adapted to artificial precipitation operation in Ji' ning was analyzed. Statistics showed that the periods of artificial precipitation operation in Ji' ning mainly concentrated from February to May, and weather systems such as cold front, transverse trough, southern trough, southern cyclones and reflux were in favor of artificial precipitation operation. The increasing precipitation of two stable precipitation processes was calculated by using regional rainfall comparison test, and the average increasing rainfall through artificial rainfall operations during 2004 – 2007 in Ji' ning area was also calculated by using the regional historical regression test. Then the effect of artificial precipitation operation in February and April was compared. The results show that different testing methods resulted in large different effect of artificial precipitation operation, and the method of regional rainfall comparison was well conducive to effect evaluation for artificial precipitation operation in Ji' ning area.

Key words: artificial precipitation; effect test; Ji' ning



(上接第 445 页)

Mechanism Analysis of a Short – term Strong Precipitation in Midsummer of 2012 in Western Shandong Province

XU Juan, JI Fanhua, HAN Fengjun, LV Bo, WANG Jian, YI Xia

(*Liaocheng Meteorological Bureau of Shandong Province, Liaocheng 252000, China*)

Abstract: The paper analyzed the weather situation, physical quantity condition and the characteristics of satellite cloud images and radar echo on July 4 2012 in western Shandong Province by using conventional observation data, intensive observation of automatic weather station as well as satellite images and radar data. The results show that this short – term strong precipitation was caused by the lower cold air and the mesoscale weather system under the background of the propitious large – scale weather system. Abundant water vapor and the strong convergence ascending motion on the level of 925 hPa and 1 000 hPa were conducive to the occurrence of strong precipitation. The positive vorticity center was corresponding to the strong precipitation center, and the surface convergence line and cyclonic circulation touched off the short – term strong precipitation. The satellite cloud images and radar data revealed the occurrence and development of the mesoscale weather system. The position and the maintain time of the mesoscale convective cloud cluster were consistent with the mesoscale system, and the same as the short – term strong precipitation. Strong radar echo region with composite reflectivity factor more than 45 dBZ corresponded with the area of the short – term strong precipitation. Appearance and maintenance of the convergence flow field in radar radial velocity product were associated with the mesoscale cyclonic circulation, as well as the echo top height rising. While appearance and maintenance of the divergence flow field, and decline of the echo top were associated with weakening of the mesoscale system. The peak of the vertical accumulated liquid water content appeared at the early stage of the short – term strong precipitation, and the peak value occurred before the stronger precipitation.

Key words: short – term strong precipitation; mesoscale weather system; mesoscale convective cloud cluster; radar echo