

王以琳,王 俊.地面人工增雨随机试验方法的探讨[J].干旱气象,2015,33(5):756-760, [WANG Yilin, WANG Jun. Discussion on Random Experiment Method of Ground Precipitation Enhancement Operation[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(5):756-760], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-05-0756

地面人工增雨随机试验方法的探讨

王以琳¹,王 俊²

(1. 山东省气象科学研究所,山东 济南 250031;2. 山东省人民政府人工影响天气办公室,山东 济南 250031)

摘 要:为了解决地面火箭人工增雨随机试验中不同移向的目标云催化后不能完全覆盖目标区的问题,提出以雷达回波移向轴线确定火箭人工增雨目标区和对比区的方法,该方法放宽了对作业目标云移动方向的要求。为得到更多的试验样本,在满足试验条件的情况下,对较长时间的降雨过程以 150 min 为间隔取样,有利于增加随机试验的样本数,减小试验周期,便于进行作业效果的统计检验。

关键词:人工增雨;随机试验;目标区;对比区;效果检验

文章编号:1006-7639(2015)-05-0756-05 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-05-0756

中图分类号:P48

文献标识码:A

引 言

自 1946 年播撒干冰进行消雹增雨后^[1],对人工增雨进行作业效果检验问题一直没有得到较好的解决。国际上,人工增雨随机试验是统计学家认可的一种进行人工增雨效果检验的试验。20 世纪多国进行过多项有影响的大型人工增雨外场随机试验,比较著名的有 2 个。一是美国 Climax 计划,它在人工影响天气历史上占有重要地位。但由于资料的限制,云顶温度和目标区雨量等问题受到质疑^[2];二是以色列三期播云随机试验得出的 7%~15% 的增雨效果^[3],是国际科学界相对普遍接受的重要试验。但后来也有人对其 I、II 随机试验播云增雨的统计显著性提出疑问^[4]。多年来我国人工增雨主要针对农业抗旱、水库增水和改善环境等目的展开,在作业效果分析中多采用统计检验^[5-7]和物理检验方法^[8-11]。1974~1986 年 4~6 月在福建古田水库流域按区域控制随机化试验方案开展的地面人工增雨外场试验,试验效果平均增雨 23.8%,统计显著性水平 $\alpha = 0.01$ ^[12]。由于受当时火箭和观测等条件限制,福建古田水库流域人工增雨随机试验结果受到一定影响。随着现代气象观测条件的显著改进,人工增雨的学术观念相应有了一定更新^[13],新

一代多普勒雷达、雨滴谱仪和区域自动雨量站等为开展人工增雨随机外场试验提供新的契机。为了研究地面人工增雨作业指标、改进作业方法和检验作业效果,山东省气象局在泰安市东平湖流域设立地面火箭人工增雨随机试验区。本文主要探讨随机试验中作业条件和标准以及活动目标区和对比区的设定问题。

1 随机试验区

按照统计学中随机试验的设计要求,结合地面火箭人工增雨特点,山东省气象局自 2014 年在泰安市东平县东平湖设立火箭人工增雨随机试验区,开展有科学设计的火箭地面人工增雨随机试验。为顺利实施火箭人工增雨随机试验,选择试验区位置的主要条件为:(1)试验区抗旱需水要求不强,使得随机试验中可以放弃约 50% 的作业机会作为对比样本;(2)试验区内村庄稀疏、作业安全性好;(3)易于申请空域,使得随机试验程序顺利进行;(4)试验过程中得到驻地气象局有力配合,作业团队人员素质高。东平湖位于南水北调东线的通路上,有调节黄河水和保护生态的功能,总面积约 627 km²,常年集水面积 124.3 km²,平均水深 2.5 m,蓄水总量 40 亿 m³,且距离济南附近的航空通道较远,空域条件良

收稿日期:2015-07-14;改回日期:2015-09-14

基金项目:社会公益性行业(气象)专项(GYHY201406033)、山东省气象局科研项目(2013sdqx06)和华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ201406)共同资助

作者简介:王以琳(1956-),男,正研级高级工程师,主要从事人工影响天气方面研究。E-mail:qxwyl@sohu.com

好。为减少因陆地村庄分布稠密带来的不安全因素和作业可持续进行,将作业区选在湖面上。在作业点位置选择中考虑到湖区堤岸自然风貌和火箭催化目标云的扩散范围,试验区内共设2个移动火箭作业点,分别是老湖作业点(35°59′52″N、116°15′13″E,海拔高度40 m)和大安山作业点(35°54′46″N、116°13′10″E,海拔高度40 m)(图1)。其中2个作业点的射击方向都朝向湖中,作业方位前者方位角230°、330°,仰角60°~80°;后者方位角355°,仰角60°~80°。

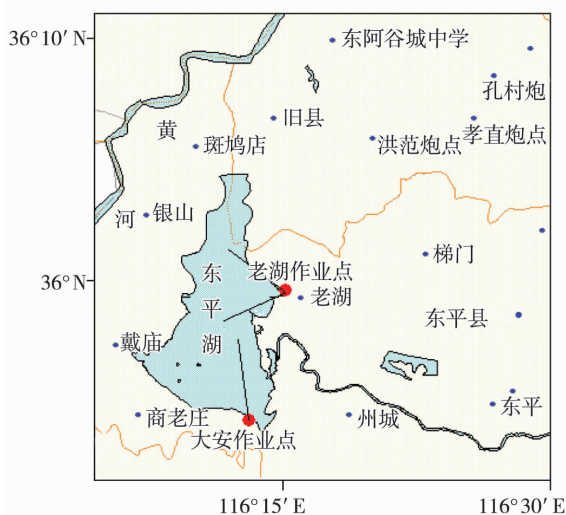


图1 东平湖区位置和2个移动作业点射击方向
Fig.1 Location of Dongping lake and shooting direction of two mobile operating points

开展人工增雨随机试验,以新一代多普勒雷达为指挥和跟踪作业的主要手段,通过收集相关卫星、雷达、探空、地面雨滴谱和地面雨量等云降水探测和观测数据,积累随机试验样本,建立多种资料融合的人工增雨随机试验样本数据库。其中,以自动雨量站10 min 雨量为样本的基本雨量统计单位,进行作业效果的统计检验;以雷达和地面雨滴谱仪观测资料对作业效果进行物理检验。采用统计检验和物理检验相结合方法给出作业效果,以完善地面人工增雨作业指标的选取,改进火箭人工增雨作业方法。

2 移动目标区和对比区

在随机试验设计中,目标区与催化云移动方向关系密切。只有催化云在移动过程中完全覆盖目标区,才有可能从目标区雨量中反映作业效果。在人工增雨效果检验中火箭与飞机播云路线都可按线源考虑,但在催化剂扩散方面火箭的播云路线较飞机要短的多。以WR-98型火箭为例,若垂直风向发

射火箭弹,模拟的影响区大致呈椭圆形分布^[14]。为了表述简便,以矩形表示其影响区,火箭沿矩形的短边方向发射,矩形的长边则为在环境风输送下一定浓度催化剂的覆盖距离。以发射仰角60°为例,WR-98火箭播云路线<6.8 km,加之扩散因素,火箭飞行方向(矩形的短边)其影响距离<10 km。即一枚火箭弹覆盖目标区的宽度最多约10 km。目标区必定设在催化影响区内,由于火箭催化覆盖面积小,如果目标云实际移动方向与设计移动方向产生偏移,其影响区也发生偏移,从而催化云区无法实现对设定的固定目标区的全覆盖。如果随机试验仅对同样路径的目标云进行抽签决定是否作业,将大大限制试验样本的数量,进而因达不到检验期要求的样本数而延长试验周期,使人工增雨随机试验难以进行下去。火箭催化云区不能全覆盖目标区,导致本来较小的增雨量淹没在区域平均雨量中,产生难以检验出作业效果的问题。如采用多枚火箭组合的方法似乎可以解决这个问题,但在实施过程中,地理条件及安全射界的限制和多具火箭协同作业的难度使得长达若干年内进行完全相同的作业试验难以为继。

从济南新一代多普勒雷达观测的降雨回波移动方向分析可知^[15],有80.6%的降雨云系移动方向为210°~315°(回波移向为雷达回波来向)。若按中值263°方向在作业下风方设立固定目标区,这80.6%的雷达回波相对263°方向的固定目标区约有±53°的偏差,对其降雨云系进行作业,火箭催化云区必定难以覆盖固定目标区。为使不同路径目标云的催化剂扩散区完全覆盖目标区,应采用活动目标区的设计。为此,提出以雷达回波移向轴线确定人工增雨目标区和对比区的方法,解决因目标云移动方向不同导致火箭催化云不能全覆盖目标区的问题,以及产生的试验样本不足和试验周期长等问题。

2.1 确定目标区

为了满足不同移向目标云的有效催化区全覆盖目标区的要求,设计了在雷达回波移向轴线上和火箭扩散区内,确定火箭催化目标区的方法。如图2所示,绿实线表示满足作业条件的雷达回波区域,箭头线为雷达回波移向轴线。火箭在作业点垂直雷达回波移向轴线发射。蓝线标出了火箭轨迹在地面的投影。根据冷云火箭催化剂线源扩散方程数值模拟的结果^[14],催化剂在扩散和环境风输送的共同作用下,播云轨迹在其下游形成一定浓度的火箭弹扩散区(图中蓝线与虚线围成的区域)。因此,在该扩散

区内将黄色矩形区域设定为作业目标区。

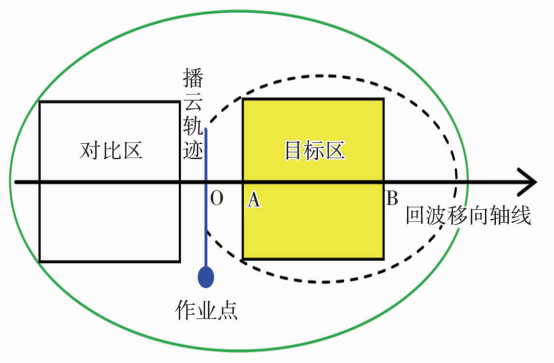


图2 目标区和对比区示意图

Fig.2 Schematic diagram between target area and contrast area

余兴等^[16]研究发现,人工催化效应的主要影响时段为20~80 min。假设飞机与火箭对云系催化的响应时间相同,以山东多年降水雷达回波平均移速约50 km/h计算^[15],如图2所示,播云轨迹O点与目标区A点之间约16.7 km的地带是没有作业效果的,人工影响效果主要分布在催化下游66.7 km内(B点)。根据以上依据,火箭弹播云轨迹与雷达回波移向轴线正交,其在地面的投影约为10 km。目标区是以雷达回波移向轴线对称的矩形,其短边为10 km,长边取50 km。如果火箭弹弹道与雷达回波移向轴线不正交,或有多枚火箭弹发射,取弹道在雷达回波移向轴线上的正交投影确定目标区。

2.2 确定对比区

根据确定对比区原则,对比区应设在目标区的上游,且与目标区的大小应基本相等。为避免催化剂污染,对比区与目标区的间隔<20 km。如图2所示,在目标区上游,相隔约20 km处,与雷达回波移向轴线对称,选与目标区大小基本相等的区域设定为对比区。

3 试验方案

3.1 签码

人工增雨随机试验是把适宜催化的机会分成2组,按照随机性原则决定一组催化,一组不催化留作对比。在这2组机会中,除了作业这一因素以外,其它因子对降水的贡献没有系统性差别^[17]。采用抛硬币方式产生随机数,理论上抛硬币的次数足够多,出现正反面的机会基本均等,规定硬币的数字面为催化作业,花面为不作业。在确定签码实施过程中,由不参加试验的人员抛硬币制作作业签码。首先按

顺序给500个信封编号,然后连续抛硬币500次,将每次抛硬币的结果按次序封入信封中,形成500个作业签码。每次天气条件符合试验条件时,待申请空域后,按顺序打开一个信封,依信封中的指令实施作业或不作业。

3.2 试验样本

一个随机试验由较多的随机样本组成,每个样本取多长时间没有统一要求,为了得到较多的随机试验样本,在一个降雨过程符合试验条件的时段内,可依次取得多个试验样本,即上一个样本时间结束后,马上申请空域进入下一个样本时间。

根据对WR-98火箭催化剂扩散的模拟^[14],当湍流扩散系数在20~100 m²·s⁻¹之间取值时,火箭弹的有效催化时间约为80~116 min。考虑到催化云移动速度的差异及其移过目标区后为下一个样本留有一定时间余地,这里将样本的时间长度统一为150 min。人工增雨随机试验中样本雨量以10 min雨量资料为基本雨量时间单位。为便于计算,取整数时间为作业开始时间,即以10 min的倍数作为样本开始时间。非催化作业单元以抽取到非催化作业签码时间最接近的整数分钟值(10 min的倍数)为样本雨量开始时间。

3.3 作业预警

该试验采用24 h作业预警,在业务值班中以山东省气象台短期预报和省气象科学研究所中尺度模式3 h滚动预报作为作业预警指标。在省内网站上,3 h滚动显示综合预警指标图形和其它与人工增雨相关的47个物理量图形。如果省气象台短期预报试验区24 h有明显降水过程,且模式3 h滚动预报在未来24 h中某个时间段内有预警指标出现(-5~-15℃层处于冰面饱和状态,且作业高度上有水汽自下向上输送和冷层水汽积分量≥9 mm),该时段将作为作业预警时段。预警指标出现时,指挥中心通知东平县气象局进入作业预警状态。而当预报试验区内有暴雨等级降雨时,取消本次作业试验。

3.4 样本标准

在系统性降雨天气背景下,以自西向东方向移动的层积混合云系为人工增雨作业目标云。省人影指挥中心指挥人员依据济南和濮阳新一代多普勒雷达的组合反射率和基本反射率产品,以目标云达到云顶高度≥6.0 km、云顶温度低于-8℃、回波强度≥25 dBZ、负温层厚度≥1.5 km和云底高度<1 km为试验条件。目标云系应处于发展、成熟或减弱阶段初期。根据2014~2015年试验区作业情况,雷达

回波移动方向约在 177° ~ 299° 范围内。

3.5 试验流程

(1) 24 h 预警后,以卫星云图和济南或濮阳新一代多普勒雷达 6 min 产品为依据,重点跟踪试验区上游约 2 ~ 3 h 降雨回波的强弱、走向和面积大小的变化。如果雷达回波满足试验条件要求,提前 2 h 通知东平县气象局进场并做好作业准备工作;

(2) 省指挥中心与作业指挥人员及时沟通,待火箭安置到位并完成作业准备后,作业人员等待指挥中心申请空域的指令;

(3) 批准空域后,作业人员立即按序号打开一个信封,并按信封中指令实施;

(4) 如果指令为作业,大安山作业点用 WR-98 型火箭,向 355° 方向发射 4 枚火箭,每发火箭发射间隔为 15 s,完成一个样本作业任务。同时,老湖作业点以间隔 15 s 的作业频率向 230° 发射 2 枚火箭,然后转向 330° 按同样的间隔发射 2 枚火箭,完成一个作业样本。150 min 后指挥中心视雷达回波演变情况决定是否进行下一个样本操作;

(5) 如果指令为不作业,150 min 后指挥中心同样视雷达回波演变情况决定是否进行下一个样本操作。

4 实施试验

2014 年,山东开始确定使用移动目标区和对比区方案进行人工增雨随机试验,即采用雷达回波移向轴线确定人工增雨目标区和对比区的方法进行试验。尽管经历了 2014 年试验开始比较晚、山东大旱无雨季的特殊气候环境和实施试验经验不足等不利因素影响,2014 年 5 月至 2015 年 8 月期间共取得 24 个样本,表 1 给出试验样本部分参数。作业云系回波移向为雷达回波的来向,24 个试验样本的雷达回波移动方向在 177° ~ 299° 之间,平均 242.4°。移动目标区和对比区的试验方案在山东省人工增雨随机试验中实现了催化影响区对目标区的全覆盖,作业试验的频率也使得随机试验可以继续下去。

在原始的山东省人工增雨随机试验方案中,采用固定目标区和对比区的设计方法。经过反复分析降雨云系雷达回波走向和影响区域后,发现若按照此方法进行试验,即便把平均移向(263°)扩大 ± 10°,即把作业云移向范围扩大到 253° ~ 273°,仍有较多次数的火箭催化影响区不能完全覆盖固定目标区。2014 ~ 2015 年试验证明:如果按照老方案,24 个随机试验样本中只有 4 个样本满足目标区全覆盖的要求,作业效果难以令人接受,显然随机试验也难

以进行下去。

表 1 2014 年 5 月至 2015 年 8 月
山东人工增雨随机试验样本

Tab. 1 Random test samples of artificial precipitation
from May 2014 to August 2015 in Shandong

签码 编号	起始 时间	结束 时间	回波移向 /°	原方法 作业样本
1	16:30	19:00	200	
2	16:00	18:30	232	
3	18:40	21:10	242	
4	21:30	0:00	245	
5	21:30	0:00	235	
6	16:50	19:20	236	
7	21:50	0:20	279	
8	15:10	17:40	269	√
9	18:10	20:40	276	
10	5:40	8:10	299	
11	9:10	11:40	246	
12	14:00	16:30	268	√
13	17:50	20:20	235	
14	22:50	1:20	177	
15	21:40	0:10	209	
16	12:20	14:50	218	
17	15:10	17:40	257	√
18	21:20	23:50	277	√
19	7:40	10:10	237	
20	17:40	20:10	235	
21	19:50	22:20	230	
22	13:50	16:20	241	
23	17:20	19:50	245	
24	19:10	21:40	233	

5 讨论

进行地面人工增雨随机试验,首先要有一能够放弃一半作业机会的试验区,这对我国以抗旱和保护生态环境为主要目的的人影工作是一个挑战。在火箭作业目标区选择中,一定浓度催化剂扩散区域对目标区的全覆盖是能否正确检出作业效果的重要问题。本文提出以雷达回波移向轴线确定人工增雨目标区和对比区的方法,在某种程度上解决了催化区对目标区的覆盖问题,同样对因目标云移动方向

不同导致试验样本不足和试验周期过长等问题的解决有很大帮助。

倘若在每个作业样本中能够实施多轮次的作业,目标云可得到更长时间的持续催化,这可能对作业效果的检出更有利。由于存在每个样本 2 轮作业时间间隔且这一时间内必须有作业空域和所有样本一致等问题,采用对目标云进行一轮催化的方法进行试验将留下遗憾。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Rangno A L, Hobbs P V, Further analyses of the Climax Cloud seeding experiments[J]. J Appl Meteorology, 1993, 32(12):1837-1847.
- [3] Gagin A, Neumann J. The second Israeli randomized cloud seeding experiment: evaluation of the results[J]. J Appl Meteorol, 1981, 20:1301-1331
- [4] Rangno A L, Hobbs P V. A new look at the Israeli cloud seeding experiments[J]. J Appl Meteorology, 1995, 34:1169-1193.
- [5] 叶家东,李铁林. 区域趋势控制协变量回归分析效果评估方法研究[J]. 气象科学,2001,21(1):64-72.
- [6] 叶家东,程克明,曾光平. 闽中雨季区域雨量统计特性及人工响应的效果[J]. 气象学报,1981,39(4):474-482.
- [7] 翟羽,肖辉,杜秉玉,等. 聚类统计检验在人工增雨效果检验中的应用[J]. 南京气象学院学报,2008,31(2):228-233.
- [8] 于丽娟,姚展予. 一次层状云飞机播云试验的云微物理特征及响应分析[J]. 气象,2009,35(10):8-24.
- [9] 金德镇,雷恒池,郑娇恒,等. 液态 CO₂ 人工引晶后云微物理和降水变化的观测分析[J]. 大气科学,2007,31(1):99-108.
- [10] 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.
- [11] 王以琳,雷恒池. 冷云飞机人工引晶检验[J]. 大气科学,2003,27(5):929-938.
- [12] 福建省气象局气科所,南京大学气象系. 古田水库地区人工降水试验效果统计分析[J]. 大气科学,1979,3(2):131-139.
- [13] 许焕斌. 关于在人工影响天气中更新学术观念的探讨[J]. 干旱气象,2009,27(4):305-307.
- [14] 王以琳,徐学义,苗长忠,等. 开发云水资源火箭人工增雨方法探讨[J]. 中国人口·资源与环境,2013,23(5):164-170.
- [15] 王俊,龚佃利,周黎明,等. 山东降水回波移动特征分析[J]. 气象,2013,39(10):1344-1349.
- [16] 余兴,戴进,雷恒池,等. NOAA 卫星云图反映 AgI 播云物理效应[J]. 科学通报,2005,50:77-83.
- [17] 叶家东,范蓓芬. 人工影响天气的统计数学方法[M]. 北京:科学出版社,1982. 303.

Discussion on Random Experiment Method of Ground Precipitation Enhancement Operation

WANG Yilin¹, WANG Jun²

(1. Shandong Institute of Meteorological Sciences, Ji'nan 250031, China;
2. Shandong Weather Modification Office, Ji'nan 250031, China)

Abstract: In order to solve the problem that target cloud moving to different direction could not completely cover target area in the ground precipitation enhancement random tests, the method via the moving axis line of radar echo to determine the target area and contrast area was put forward. The method relaxed the requirement to the moving direction of target cloud. Under the meeting test conditions, the samples were collected at 150-minute interval for a long time rainfall process to get more experiment samples and shorten experiment circles. Thus, it will be easy to carry out the statistical test of operation effect.

Key words: precipitation enhancement; random experiment; target area; contrast area; effect test