

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.
WANG Jun. Discussion on design of statistical test scheme for effect of artificial precipitation enhancement by artillery and rocket [J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(4): 33-41. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.04.004. (in Chinese)

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

王俊

(山东省人民政府人工影响天气办公室, 山东 济南 250031)

摘要: 基于理想化的人工增雨概念模型, 分析了地面增雨作业效果检验试验区设计的基本特征, 以及作业轮次、云系移动速度、催化云系对试验区中雨量点的覆盖率等因素对效果评估的影响, 主要结果为: 1) 云系移动速度应该作为目标云选取的一个重要指标, 它直接影响试验区的长度和作业点的布局, 对效果评估也有很大的影响, 不同移动速度的目标云系将人工增加的降水分散到不同的区域, 增加了效果评估的难度。2) 存在一段最短时间的雨量资料可以用于效果评估, 它由试验区长度、作业时间和目标云移动速度共同决定。3) 分别给出了作业时间与用于效果统计的雨量时间之比、催化云系对试验区雨量点的覆盖率影响相对增雨率的计算公式, 据此定量分析了以色列 I 随机试验资料, 结果表明要评估出一定的相对增雨率, 需要人工催化云系具有较大的增雨量, 即较为显著地改变自然降水。

关键词: 人工增雨; 效果检验; 方案设计; 试验区; 相对增雨率

中图分类号: P481 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)04-0033-09

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.04.004

Discussion on design of statistical test scheme for effect of artificial precipitation enhancement by artillery and rocket

WANG Jun

(Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031, China)

Abstract According to observations of field test and numerical simulations, the basic characteristics of the design of the test area for the effect test of surface precipitation enhancement operation are analyzed by using the ideal conceptual model of artificial precipitation enhancement. The influence of operation sequence, moving speed of cloud system, and coverage rate of catalytic cloud system on the rainfall points in the test area on the effect evaluation is investigated. The results are shown as follows. 1) The moving speed of cloud system should be regarded as an important indicator of selecting target cloud, which directly affects the length of the test area and the layout of operation points, and also has a great impact on the effect evaluation. The target cloud system with different moving speed distributes the artificial precipitation to different areas, which increases the difficulty of the effect evaluation. 2) There exists the rainfall data of the shortest time span, which is jointly determined by the length of the test area, operation time, and moving speed of the target cloud, and it can be used to evaluate the effect. 3) The calculation formulas of the ratio of operation time to rainfall time used for statistics of effect, and the relative precipitation enhancement rate by the influence of catalytic cloud system on the coverage rate of

收稿日期: 2020-08-18; 修订日期: 2020-10-28

基金项目: 公益性行业(气象)专项(GYHY201406033)

通信作者: 王俊, 男, 研究员级高级工程师, 主要从事云降水物理研究, wangjun818@sohu.com。

the rainfall points in the test area are given, respectively. Based on these formulas, the randomized experiment data of Israel I are quantitatively analyzed. The results show that to evaluate a certain relative precipitation enhancement rate, it is necessary to artificially catalyze the cloud system to have a greater precipitation enhancement, that is, to change the natural precipitation significantly.

Key words artificial precipitation enhancement; effect test; scheme design; test area; relative precipitation enhancement rate

引言

国内外大量实践表明,只有通过有科学设计的、长期稳定的科学示范试验才能对人工增雨作业的效果作出可靠的科学评估^[1]。而人工增雨的试验方案设计是一个很复杂的系统工程,其中包括人工增雨的催化原理、合适的试验对象、催化条件选择、恰当的催化技术和综合观测技术等,每一个方面都会对最终的人工催化作业效果产生重要影响,因此,科学的设计外场试验方案属于人工影响天气领域的重大科技问题和未来研究工作的重点之一^[2]。

人工影响效果评估涉及催化云系的宏微观特征、目标区的大小、作业工具、作业时间等许多因素,方案设计过程需要充分考虑这些因素对效果评估的可能影响。某一时段的雨量资料是进行效果评估的主要依据,目前,采用多长时段的雨量资料作为统计变量进行效果评估还没有统一的规定。美国加利福尼亚州阿尔马诺湖5 a(1962—1967年)地面燃炉增雪随机试验^[3]使用12 h和年雨量作为统计变量,12 h为一个试验单元,其中11 h催化作业,1 h不作业,统计表明分别具有37%和5%的相对增雨率,而最大增雨效应出现在下风方8~18 km处(风速为16~48 km·h⁻¹)。克莱马克斯(Climax)试验I和II统计评估采用的是日雨量作为统计变量^[4-6],主要结果是500 hPa温度在-20~-12℃、风速为22~28 m·s⁻¹时,或者700 hPa风向在190°~250°、风速为12~14 m·s⁻¹时具有最大增雨率。以色列随机试验计划I和II中,试验单元为日,只要云层适合飞机飞行就进行增雨作业,试验单元的最后一小时不作业,日雨量作为统计变量^[7-8],相对增雨率分别是15%和13%,最大播云效应出现在催化线下风方20~50 km处。福建古田水库随机试验^[9]采用的是3 h的雨量资料进行统计检验,三种不同的统计分析方法(区域回归分析法、双比分析法和多元回归分析法)均表示122次催化平均相对增雨率在20%左右,显著度高于5%水平。

澳大利亚的新南威尔士播云试验^[10]显示不同的区域平均日降水量也会影响播云效应,6 a的资料统计表明日降水量在2.5~12.5 mm时具有10%~20%的增雨率,在12.5~25.0 mm时具有负的增雨率,而小于2.5 mm的弱降水基本没有变化。另外,有关分析^[11]表明,播云效应主要影响降水的持续时间,700 hPa相对位温较高的冷云可以明显增加持续时间,而700 hPa相对位温比较低时持续时间会略有减少。GABRIEL and ROSENFELD^[12]对以色列II播云试验分析显示,北面试验区具有正的增雨率而南面试验区具有负的增雨率。进一步的分析^[13]表明,以色列II播云试验中的北面试验区在202 d的无尘日中增雨率为26%,而在182 d的有尘日中没有增雨效果;以色列II播云试验中的南试验区和以色列III试验中,无尘日比有尘日降雨增加16%,沙尘和霾等可能是南北试验区增雨效果差异的主要因素。

作业时间占降水时间的比例也是效果评估中的一个重要因素,以色列随机试验I的7个作业季节中,相对于北和中间的作业区,南作业区每个季节飞机催化作业时间约为70 h,分别约占降水时间的四分之一和三分之一^[14],也就是说,增雨效果是由较少比例的被催化云系产生的。冬季地形云增雪一般是采用地面播撒设备,具备连续作业的条件,一天中可以只有2 h作为缓冲时间而不作业。福建古田水库随机试验^[9]一个作业单元的作业时间一般不超过0.5 h。

以往更多关注降水的自然起伏对效果评估的影响^[15-16],本文在考察地面人工增雨作业(火箭、高炮)基本过程的基础上,利用理想化的人工增雨概念模型,分析目标云移动速度、作业时间、试验区的大小、催化云系对试验区中雨量点的覆盖率和作为统计变量的雨量等因素之间的相互联系以及这些因素对方案设计、作业效果评估等的影响,进一步计算分析以色列随机试验统计结果的意义,这些分析结果可以为未来外场试验方案设计和开展外场作业试验提供有益的参考。

1 基本假设

后面的分析过程需要一些基本的假设条件,这些假设来源于以前的外场试验观测和数值模拟研究结果。

1) 目标云为层状云、弱积层混合云,不包括较强对流云,即目标云中的上升速度小于 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 或者与之相当,湍流扩散是催化剂分散的主要因素。在一定时间、一定范围内降水较均匀,即雨强变化不大。

2) 基于静力催化假设,胡志晋^[17]指出,人工催化后水汽的补充凝华和过冷水冻结释放的潜热能使空气加热 10^{-1} K 的量级,云中升速增大 $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的量级,一定程度上能促进催化区云和降水的发展,但不能导致明显的宏观特征的改变。

3) 忽略不同移动速度云系之间云中微物理过程的差异,包括催化剂在云中的扩散、粒子的增长过程,以及增雨量等。实际上环境大气风速与湍流扩散系数有一定关系^[18-19],即对云中催化剂的湍流扩散有影响,文中为了分析简便而暂不考虑这一效应。

4) 仅考虑人工影响的直接效应,不考虑上下游效应所产生的间接效应^[20]。

2 试验区长度与作业点距离分析

火箭、高炮发射一枚或几枚火箭弹、炮弹进入云中,模拟的影响区大致呈椭圆形分布^[21],催化剂扩散后形成人工催化区域垂直剖面如图1所示。催化区域 S_1 (也就是催化剂有效扩散的区域) 的宽度为 L (沿云系移动方向),其中心点和前沿在地面的投影分别为 A_0 和 A_1 点, A_1 距离试验区前沿 O 点的水平距离为 L_1 ,试验区的长度 OB 为 L_2 ,云系移动速度为 U 。

人工冰核在云中经过核化、凝华增长和碰并增长等微物理过程形成大粒子最后落到地面,最短或者最快时间为 t_1 (即第一批人工冰核形成的雨滴落到地面的时间),而最长时间为 t_2 (也就是最后一批人工冰核形成的雨滴落到地面的时间),因此,催化剂有效作用时间为 $(t_2 - t_1)$ 。 L_1 的最佳距离为 $L_1 = U \times t_1$,而 L_2 的最佳长度为 $L_2 = U \times (t_2 - t_1)$ (最先和最后落地的雨滴处于什么位置很难确定,本文为了方便分析而简化为在催化区域的前沿和后沿位置),在这样的设置下,人工增加的降水可以有效地落到试验区。

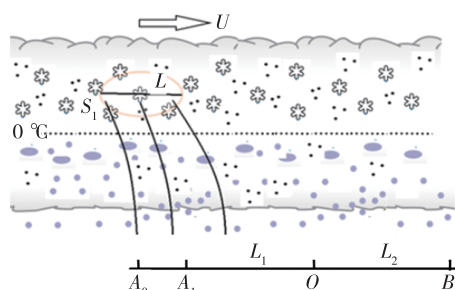


图1 人工增雨催化区域和试验区示意图(经过催化区域中心沿云系移动方向的垂直剖面图)

Fig.1 Schematic diagram of area of artificial precipitation enhancement operation and test area (vertical cross section along moving direction of cloud system through center of catalytic region)

在实际试验方案设计中,需要确定各个参数的具体数值。卫星观测云顶变化^[22]表明,人工催化效应的主要影响时段为 $20 \sim 80 \text{ min}$ 。澳大利亚外场试验^[23]显示,积云催化后 $20 \sim 25 \text{ min}$ 产生降水,而层状云稍慢一些。根据这些观测结果, t_1 取 30 min ,而 t_2 不小于 90 min 。云系的移动速度 U 变化比较大,4 a 资料分析表明雷达回波的移动速度有很大的跨度^[24],由于 L_1 和 L_2 与 U 成正比,所以, L_1 和 L_2 随着 U 的不同而有很大差别,这要求方案设计过程需要仔细考虑作业点和试验区的布局。一些外场试验对此也有认识并采取了措施,如福建古田水库随机试验^[25]发现层状云雨量增加的区域比积状云明显要大得多,因此认为对于不同的降水类型,目标区的设置应该是不同的。以色列随机试验 I^[13]飞机作业航线位于海上且平行于海岸线,与海岸线的距离根据风速大小而不同,约等于云系 30 min 的移动距离(即 t_1 取 30 min);而试验 II 作业航线是固定的。显然,这样的做法体现了两种设计思路,即固定作业点和移动作业点,下面分析两种情况下作业点和试验区的布局。

第一种情况是作业点不固定或者多个作业点。由于 t_1 基本取 30 min ,所以 L_1 主要受云系移动速度的影响,由于地面作业点的设置不可能像飞机空中航线一样比较自由的设计,所以在实际地面方案设计中,可以根据云系移动速度将目标云分成几档,如 $20 \sim 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $40 \sim 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $60 \sim 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,则分别在距离试验区前沿 O 点之前 $30t_1 + L/2$ 、 $50t_1 + L/2$ 、 $70t_1 + L/2$ 的 A_{01} 、 A_{02} 、 A_{03} 处设置火箭或高炮作业点(火箭作业点一般不与点 A_0 重合,为了分析方便而简化为两者是一致的)(图 2a),每个作业点只对一定移动速度范围的目标云进行催化作业。这样,

对不同移动速度的云系,不同的作业点开展增雨作业,人工增加的降水开始落到地面的地点基本是相同的,即试验区的前边界 O 点(靠近作业点的一侧)基本固定。

试验区的前边界可以通过设置不同距离的作业点来确定,试验区远离作业点一侧的边界如何确定呢?试验区的宽度 L_2 的最佳长度为 $L_2 = U \times (t_2 - t_1)$,在 $(t_2 - t_1)$ 一定的条件下(这隐含着云系移动速度不影响云中微物理过程的假设), L_2 与 U 成正比,如假设 $(t_2 - t_1)$ 为 90 min (即 $t_2 = 120$ min, $t_1 = 30$ min), U 分别取 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,则 L_2 分别等于 45 km、75 km、105 km,分别对应图 2a 中的 OB_1 、 OB_2 、 OB_3 (固定试验区前沿),显然,对于移动速度存在较大差别的目标云系,试验区的长度很难统一。如果试验区的长度选为 OB_3 ,则在云系移动速度较低时只有 OB_1 或 OB_2 区域有增雨效果,而其他区域(如 B_1B_3 、 B_2B_3)只有自然降水。同样,如果试验区的长度选为 OB_1 ,则在云系移动速度较大时最大增雨效果区域有可能位于 OB_1 之外,也不利于效果评估。

针对这种情况,实际方案设计中可以采取以下方法,即以该地区出现频率最高的云系移动速度 U_z 为标准,其对应的作业点为 A_{02} (图 2b),试验区长度为 O_2B_2 、中点为 O 。根据实际情况设置云系移动速度 $U_z \pm \Delta U$ 范围,以及作业点 A_{01} 和 A_{03} 的位置,使移动速度为 $U_z - \Delta U$ 和 $U_z + \Delta U$ 云系的试验区 O_1B_1 和 O_3B_3 的中心点也为 O (固定试验区中心)。由于增雨效果主要分布在 O 附近, ΔU 取值不大的情况下, O_1 、 O_2 和 O_3 (或者 B_1 、 B_2 和 B_3)靠得较近,可以根据业务中的实际需要,确定具体试验区的大小。

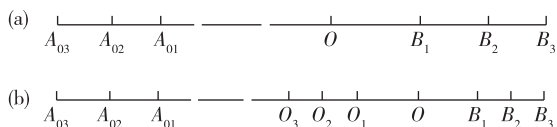


图2 多作业点、不同移动速度云系时试验区方案设计 (a.固定试验区前沿,b.固定试验区中心)

Fig.2 Scheme design of test area with multiple operation points and cloud systems with different moving speed (a. front of fixed test area, b. center of fixed test area)

第二种情况是只有一个作业点或者几个距离较近的作业点(如福建古田水库随机试验),对不同移动速度的目标云进行催化作业,由于 L_1 和 L_2 与 U 成正比,所以试验区的前边界和后边界都不固定,

即不同移动速度的目标云对应的试验区差别大、不能重合,唯一的办法是对目标云系的移动速度进行限制,即只对一定速度范围的云系进行作业。

通过上述分析可以看出,由于目标云具有明显的移动特征,导致作业点的布局和试验区的确定出现困难。在云系移动速度差别比较大的情况下,可以采取两种方案,一是采用多作业点,即纵向多建几个作业点,由远及近的作业点分别对应由快到慢的目标云,即使这样仍需要对云系移动速度有一定的限制;第二是只有一个作业点,则需要对目标云系的移动速度有较强的限制。

3 作业时间与统计效果关系分析

3.1 一轮次作业效果检验可行性分析

由于空域等因素的影响,目前国内地面火箭、高炮很难连续开展增雨作业,只能间隔一定时间开展短时间的作业,如山东一轮次作业的空域时间 T_k 只有 3~5 min,可发射火箭 1~4 枚^[26]。一种作业方式是预先确定发射 N 枚火箭,火箭发射的方位角、仰角不变(常用的一种方式垂直于云系移动方向发射火箭弹或炮弹),间隔 T_k/N 发射一枚火箭,这样一轮次作业形成的催化区域如图 1 中的 S_1 ,其沿着移动方向的宽度为 L 。所以,催化区域经过雨量点的时间 $t_0 = L/U$,显然这一时间的长短取决于云系移动速度和催化区域宽度。

如果采用 T_0 时间段的雨量进行效果评估,则这段时间里只有 t_0 时间段里包含人工影响效果。下面从两个方面分析相对增雨率的一些特征,一是假设 t_0 时间里相对增雨率为 e_0 ,并且 T_0 时段降水比较平稳,即雨强变化不大,则利用 T_0 时间的雨量资料可以检测出的相对增雨率 $E_0 = (t_0/T_0) \cdot e_0$ 。反过来说,假设 T_0 时间里相对增雨率为 E_{01} ,并且 T_0 时段降水比较平稳,则 t_0 时间的雨量资料需要具有的相对增雨率 $e_{01} = (T_0/t_0) \cdot E_{01}$ 。

实际降水过程雨强是变化的,所以计算会比较复杂^[27],但假设雨强均匀可以进一步计算出一些有意义的结果,对我们理解统计结果有帮助。利用具体数值分析 E_0 和 e_0 、 e_{01} 和 E_{01} 之间的大小关系。 T_k 取 5 min,这段时间里均匀发射 1~4 枚火箭弹,催化剂的扩散半径 d_1 取 2.0 km,这比王以琳等^[21]数值模拟的单枚火箭最大扩散半径 1.5 km 稍大一些,主要考虑多枚火箭可能存在叠加效应。另外,由于云系移动,5 min 作业时间中第一枚和最后一枚火箭之间云系移动宽度为 $U \times T_k$ 。所以,催化区域 S_1 的

有效宽度 $L=2d_1+U \times T_k=2d_1+U/12$ 。

U 取 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 则 $t_0=L/U=11 \text{ min}$, T_0 取值 180 min , 若 e_0 取 30.0% , 则 E_0 约为 1.8% ; 若 E_{01} 取值 10.0% , 则 e_{01} 约为 163.6% 。由于只有一轮次作业, 在效果评估时间里只有较少比例的时间里包含人工影响效果, 所以人工影响效果被做了较大的稀释, 严重影响了检出人工影响效果的可能性。

3.2 多轮次作业效果检验可行性分析

下面分析多轮次作业对效果评估产生的影响。假设每间隔 L/U 时间开展一轮次增雨作业, 共开展 n 轮次, 这种情况下, 催化区域可以连接在一起(图3), 与飞机采用“8”字形作业^[28]一样形成连续的催化作业区域。

仍采用 T_0 时间段的雨量进行效果评估, 则这段时间里 nt_0 时间里包含人工影响效果。假设 nt_0 时间里相对增雨率为 e_{0n} , 则利用 T_0 时间的雨量资料可以检测出的相对增雨率 $E_{0n}=n \cdot (t_0/T_0) \cdot e_0$ 。反过来说, 假设 T_0 时间里相对增雨率为 E_{01} , 同样假设 T_0 时段降水比较平稳, 雨强变化不大, 则 nt_0 时间的雨量资料需要具有的相对增雨率 $e_{0n}=[T_0/(n \cdot t_0)] \cdot E_{01}$ 。

U, t_0, T_0 仍取 3.1 节中的数值, n 取 3, 若 e_0 取 30% , 则 E_{0n} 约为 5.5% ; 若 E_{01} 取值 10% , 则 e_{0n} 约为 54.5% 。目前, 我们都只是评估出 E_{01} (或者 E_{0n}), 对于 e_{01} (或者 e_{0n}) 则无从知道。下面根据以色列随机试验的公开资料, 来推断 e_{01} (或者 e_{0n}), 由此, 可以反过来分析 E_{01} (或者 E_{0n}) 的合理性。以色列试验 I 中, 每个季节飞机催化作业时间约为 70 h , 分别约占降水时间的 $1/4$ 或 $1/3$ ^[14], 也就是说, 增雨效果是由较少比例的被催化云系产生的。 $T_0/(n \cdot t_0)$ 分别取 $3, 4, E_{0n}$ 为 15.0% , 则 e_{0n} 分别为 45.0% 和 60.0% 。假设降水期间降水比较均匀, 如果人工催化作业时间只占降水时间的 $1/4$ 到 $1/3$, 要评估出 15.0% 的相对增雨率, 需要催化作业云系具有 $45.0\% \sim 60.0\%$ 的相对增雨率。这些分析表明, 由于降水期间只有较少比例的云系被进行人工催化, 所以要评估出一定的相对增雨率, 需要被催化云系具有较大的相对增雨率。而对于地形云增雪, 地面燃烧炉作业时间长, $T_0/(n \cdot t_0)$ 接近等于 1, 所以相对增雨率变化不大。因此, 在实际业务中, 在没有给出地面作业轮次等信息、空中飞机作业航线特征的情况下来谈论相对增雨率是不科学的。

3.3 效果评估最短时间分析

目前, 各地采用多长时段的雨量资料作为统计变量进行效果评估还没有统一的标准, 如古田水库

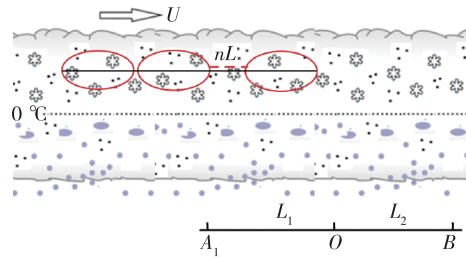


图3 多轮次催化作业示意图(经过催化区域中心沿云系移动方向垂直剖面图)

Fig.3 Schematic diagram of multiple rounds of catalytic operations (vertical cross section along moving direction of cloud system through center of catalytic region)

人工增雨试验采用 3 h 的雨量资料进行效果评估^[9], 夏彭年^[29]则采用 $3 \text{ h}, 6 \text{ h}, 9 \text{ h}$ 和催化后总雨量进行效果评估, Climax 试验和以色列试验则是采用日雨量作为统计变量^[3,6]。但是采用日雨量会存在作业时效问题, 原因是有些作业日的主要降水出现在作业之前, 用日雨量检验就会出现^[30]。那么, 使用多长时间的雨量资料进行效果评估会有最优的结果呢?

通过上面分析可以看出, 作业时间, 以及使用多长时间雨量资料对效果评估有很大影响, 如果作业时间一定, 使用越短时间的雨量资料越能给出较大的相对增雨率; 而雨量资料不变的情况下, 作业时间越长越容易评估出作业效果。下面根据作业情况和试验区大小等因素分析是否存在最短时间的雨量。试验单元之间有一个基本要求, 即要避免试验单元间的相互影响, 前一催化单元所播撒的催化剂不应该残留到下一试验单元。图4是两个催化单元 UN_1 和 UN_2 , 以及每个单元包括多轮次作业示意图, 可以看出, 要使得两相邻催化单元之间不相互影响, 需要前一催化单元的催化区域的后缘刚离开试验区的 B 点, 而后一催化单元的催化区域的前缘刚到达 O 点, 这样相邻两催化单元间的距离 $L_0=L_2+nL$, 而时间间隔 $T=(L_2+nL)/U$, 显然, 小于时间 T , 催化单元之间出现相互影响, 不能满足效果评估的需要。因此, 这一时段的雨量资料是进行效果评估的最短时间, 这一时间与云系移动速度、试验区长度和催化区域的宽度(由作业轮次 n 和每一轮次催化剂的扩散宽度共同决定)有关系。

以福建古田水库资料为例进行初步分析^[9], $U=30.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}, L_2=45.0 \text{ km}, L=25.0 \text{ km}$ ($L=2d_1+U \times T_k$ 为作业时间内云系的移动宽度和催化剂的扩散宽

度之和,催化剂的扩散宽度取10 km),则 T 为 140 min,所以采用 180 min 的资料进行效果评估是合适的。使用接近最短时间雨量资料进行效果评估,优点是评估出较高的相对增雨率,不足之处是对作业方法和事后分析有了较严格的限制。福建古田水库随机试验^[9]结果表明增雨效果大于等于 20% 区域位于作业点下风方 15~50 km,这一区域比开始设计的试验区域大,而增雨效果大于等于 10% 和 1% 的区域应该更大,如果区域的远边界超过 70 km,则催化云系移出的时间超过了 3 h,相邻催化单元之间就存在相互影响。还有一个因素是如果作业时间超过 1.5 h,则催化云系移出的时间也会超过了 3 h。因此,从这一角度出发,使用较长时间的雨量资料作为统计变量进行效果评估更为有利。

上述分析对于开展高炮、火箭增雨作业的方案设计和效果评估有什么指示意义呢? 山东中西部降水云系雷达回波的典型移动速度约为 $50 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右^[24]、方向为西和西偏南,对于这样的目标云系,作业点距离试验区 25 km 左右,试验区的最佳长度为 70~80 km。如果一轮次空域时间 3 min,垂直云系移动方向均匀发射 4 枚火箭弹,催化剂有效扩散范围约为 6.5 km,利用 3 h 雨量在作业全覆盖情况下如果相对增雨率为 30.0%,则 1 轮次、2 轮次和 3 轮次作业可以检测出的相对增雨率分别为 1.3%、2.6% 和 3.9%。所以,要开展效果检验需要尽量增加作业轮次,或者选择移动速度偏慢的云系作为目标云。

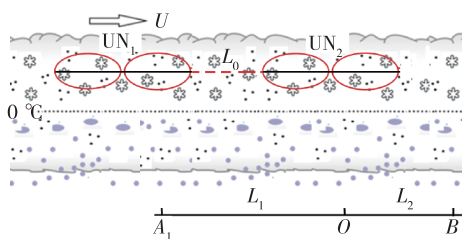


图4 两催化单元、多轮次人工增雨作业示意图
Fig.4 Schematic diagram of two catalytic units and multiple rounds of artificial precipitation enhancement

3.4 理想的作业时间与试验区长度之间的关系分析

一轮次作业很难评估出作业效果,需要进行多轮次作业。显然,要有效地评估出作业效果,最理想的情况是 T_0 时间的雨量资料都包含催化作业效果,也就是说,催化作业区域经过每一个雨量点的时间都不小于 T_0 ,下面分析这种理想情况下需要多少轮次的催化作业。假设作业点进行 n 轮次作业,

相邻两轮次作业间隔的时间为 L/U ,这样可以使催化作业区域连成片(图3)。 O 、 B 两点各有一个雨量计,假设催化云系 t_s 时刻影响 O 点的雨量计,则影响结束的时刻为 t_s+nL/U ,而催化云系影响 B 点雨量计的时刻为 t_s+L_2/U ,影响结束的时刻为 $t_s+L_2/U+nL/U$,催化云系在试验区最大持续时间为 $L_2/U+nL/U$ 。在时刻 t_s+L_2/U 之前,有雨量计没有受到影响,而在时刻 t_s+nL/U 之后,有雨量计逐渐结束被影响。一般情况下新一轮次作业 L 小于 L_2 ,意味着催化云系不能全覆盖试验区。在多轮次催化作业的情况下,若 $nL/U-L_2/U \geq 0$,意味着催化云系可全覆盖试验区;若 $nL/U-L_2/U < 0$,意味着催化云系不可能全覆盖试验区。

要使得 T_0 时间的雨量资料都包含催化作业效果,就需要 $nL/U-L_2/U \geq T_0$,所以, $n \geq (UT_0+L_2)/L$ 。此时,两催化单元之间间隔的时间 $T=(L_2+nL)/U=T_0+2L_2/U$ 。

假设 $U=50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $L_2=70 \text{ km}$, $L=2d_1+U \times T_k$, T_0 取 3 h, T_k 为 5 min,则 n 等于 27,也就是一个催化单元需要间隔 9.8 min 开展一轮次作业,连续开展 27 次,催化作业区域的长度至少为 212 km,两催化单元之间间隔的时间约为 5.8 h。这样的条件在实际业务中是很难实现的,一方面间隔 10 min 左右连续开展二十几次作业,空域方面很难满足;另一方面满足作业条件的云系尺度大于 200 km 也是比较困难的。

3.5 云系移动速度对效果评估的影响

上面有关分析表明,云系移动速度对试验区的大小和取多长时间的雨量资料进行效果评估都有很大影响,对效果评估也会产生重要影响。我们假设云系移动很慢,通过人工催化作业后,地面可以检测出的相对增雨率为 E_2 ,对于移动较快云系进行同样的催化作业,在试验区可以检测出的相对增雨率为 E_3 ,如果假设云系移动速度不影响云中微物理过程,则可得到: $E_3=(U_2/U_3) \cdot E_2$,假设 $U_2=10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $U_3=50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,则 E_3 只有 E_2 的 20%。

从物理意义上很容易理解上述结论,在一次增雨作业增加的降水量一定的情况下,云系移动速度越快,则增加的降水被分散到更大的区域,所以相对增雨率也就越低。3.1 节是从催化区域经过雨量点的时间这一角度进行了分析,本节是从催化云系经过的区域这一角度作了分析,两者得出的结论是一致的。因此,在选择作业指标时,云系移动速度也应该作为重要因素考虑。澳大利亚塔斯马尼亚

(Tasmania)播云试验^[23]就考虑了云系移动速度,其指标是层状云作业层风速小于 $130 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,积云则是在云底风速小于 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

4 试验区雨量点覆盖率的影响

以上分析都是催化云系对下风方经过区域的影响,也就是纵向影响。显然,催化云系对试验区还存在横向覆盖问题。图 5 是一轮次作业形成的催化区域 S_1 和试验区平面图, S_1 垂直于风速 U 的最大水平宽度为 L_h ,试验区的宽度为 L_H 。 L_h 与火箭型号、发射仰角、 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ (或 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$) 层高度和催化剂扩散等因素有关,如大连地区 1 枚 WR-1B 型火箭的 L_h 为 $6 \sim 11 \text{ km}$ ^[31-32], L 为 $3 \sim 6 \text{ km}$,每个作业点防护的面积约为 50 km^2 。

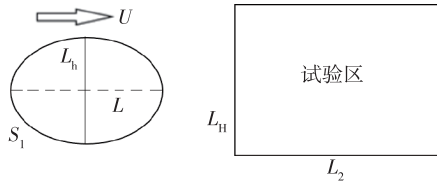


图 5 催化剂有效扩散区域和试验区水平示意图
Fig.5 Horizontal schematic diagram of effective diffusion area of catalyst and test area

一轮次作业发射几枚火箭的情况下, L_h 、 L 与作业方式有很大的关系,王以琳等^[21]建议 T_k 空域时间里采用迎风发射 3 枚火箭,此时 L_h 最大约为 20 km ,横向防护范围明显增大,但 L 不变,即催化云系经过某个雨量点的时间不变。在 3.1 节中我们建议一轮次作业的方式是火箭发射的方位角、仰角不变,在一定的空域时间里均匀发射几枚火箭,此时 L_h 不变而 L 明显增大,但这种情况下需要多火箭点联合作业来增大 L_h ,要完全覆盖试验区,需要 $N_r = 1 + L_H/L_h$ 部火箭间隔 L_h 布设在同一方向上,并按照同样的方位角和仰角,同时开展作业,则可形成 $N_r \cdot L_h$ 长的线源。

假设试验区域中共有 N_1 个雨量点,一次催化作业能覆盖的雨量点为 n_1 个,理想的情况是 $N_1 = n_1$,但大多数情况是 n_1 小于 N_1 ,那么分别利用 n_1 和 N_1 个雨量点资料进行效果评估,它们之间有什么差别呢? 首先假设在一定时间内试验区中降水较均匀,即雨强变化不大,这样分别利用 n_1 和 N_1 个雨量点给出的平均雨量是相等的,另外,利用 n_1 和 N_1 个雨量点分别计算出的总增雨量也是一样的,根据这些条件可以得到: $E_n = (N_1/n_1) \cdot E_N$ 或者 $E_N = (n_1/N_1) \cdot E_n$ 。

E_n 、 E_N 分别是利用 n_1 、 N_1 个雨量点评估出的相对增雨率。表 1 是 E_N 或者 E_n 随着 n_1/N_1 取不同比值时的 E_n 和 E_N 的变化。可以看出, n_1/N_1 的值也就是催化云系在试验区的覆盖率对效果评估有影响,如果 E_N 要达到 20%,则随着覆盖率的降低(即 n_1/N_1 值减小),需要被影响的雨量点具有更高的相对增雨率 E_n 。如果全覆盖情况下可以评估出 20% 的相对增雨率,随着覆盖率的降低(n_1/N_1 减小),可以评估出的相对增雨率 E_N 逐渐减小。

表 1 E_N 、 E_n 与 n_1/N_1 的关系

Table 1 Relationship between E_N , E_n , and n_1/N_1

$E_N/\%$	$E_n/\%$	n_1/N_1
2.0	200.0	0.1
4.0	100.0	0.2
6.0	66.7	0.3
8.0	50.0	0.4
10.0	40.0	0.5
12.0	33.3	0.6
14.0	28.6	0.7
16.0	25.0	0.8
18.0	22.2	0.9
20.0	20.0	1.0

目前,作业工具主要是飞机、地面高炮、火箭和燃烧炉,它们各有优缺点。中国中东部地区人口密集,为了保障高炮、火箭人工增雨作业的安全实施,作业点都不具备 360° 或者 180° 的连续作业区域,一般只有有限的几个安全作业区域^[33-34],所以一个作业点有效影响范围 L_h 比较窄。另外,由于空域等限制,一般不能连续开展增雨作业。地面燃烧炉可以连续作业,催化剂在下风方形成纵向线源,但不足之处是与高炮、火箭一样,横向影响范围太窄。飞机作业航线可以影响较大的区域,采用“8”字形作业航线可以形成覆盖较大范围的催化区域^[28],但不足之处是一架飞机难以连续作业,需要几架飞机协同作业。人工影响试验区少则几百平方千米,多则上千或者上万平方千米,飞机作业的影响区域基本可以覆盖试验区,而一个高炮、火箭或者燃烧炉作业点的影响区很难完全覆盖试验区,显然,这增加了效果检验的难度。

5 结论

分析了目标云移动速度、作业时间、试验区的大小、催化云系对试验区中雨量点的覆盖率和作为

统计变量的雨量等因素之间的相互联系以及这些因素对方案设计、作业效果评估等的影响,进一步计算分析了以色列随机试验统计结果的意义,主要结果为:

1) 试验区的长度和作业点离试验区的距离与目标云的移动速度成正比例,云系移动速度应该作为目标云选取的一个重要指标。目标云移动速度差别较大时,可以利用沿云系移动方向分布的多个作业点进行作业,这样有利于催化效果有效地落到试验区。

2) 存在最短时间的雨量资料可以用于效果评估,它由试验区长度、作业时间和目标云移动速度共同决定。对于火箭、高炮和飞机等催化工具,理想的作业不论从空域、作业强度和目标云尺度都很难满足和实现,在一个试验单元中尽可能多开展几轮次作业有助于效果评估。

3) 火箭作为催化工具开展外场试验,需要根据试验区大小建设多个火箭作业点,相邻作业点间隔一定距离(如8 km)排列在与云系移动垂直的方向上。作业方式是各个作业点火箭按照相同方位角、仰角、间隔相同时间在相同的空域时间里均匀发射几枚火箭弹,形成一定长度的线源。

4) 以色列 I 随机试验资料分析表明,要利用日雨量评估出 15.0% 的增雨率,人工催化云系的影响时间里需要 45.0% 以上的相对增雨率。这要求人工催化明显改变自然降水,根据目前的人工增雨机理,人工影响是否具有这样的作用值得商讨。

云系的移动特征(包括移动方向和速度)对效果评估有很大的影响,不同移动速度的目标云系将人工增加的降水分散到不同的区域,增加了效果评估的难度。以往的试验更多考虑移动方向而忽视移动速度的影响,这一点需要引起试验者的重视。

参考文献:

- [1] 胡志晋,王广河,王雨增.人工影响天气工程系统[J].中国工程科学,2000,2(7):87-91.
- [2] 郑国光,王辉,翟盘茂,等.人工影响天气轨道业务卷(内部试用)[M]//秦大河,王辉,翟盘茂,等.中国气象局业务技术体制改革培训教材(普及版).北京:中国气象局,2007.
- [3] MOONEY M L, LUNN G W. The area of maximum effect resulting from the Lake Almanor randomized cloud seeding experiment [J]. J Appl Meteor, 1969, 8 (1): 68-74.
- [4] MIELKE P W Jr, GRANT L O, CHAPPELL C F. Elevation and spatial variation effects of wintertime orographic cloud seeding[J]. J Appl Meteor, 1970, 9(3): 476-488.
- [5] MIELKE P W Jr, GRANT L O, CHAPPELL C F. An independent replication of the Climax wintertime orographic cloud seeding experiment [J]. J Appl Meteor, 1971, 10(6): 1198-1212.
- [6] MIELKE P W Jr, BRIER G W, GRANT L O, et al. A statistical reanalysis of the replicated Climax I and II wintertime orographic cloud seeding experiments [J]. J Appl Meteor, 1981, 20(6): 643-659.
- [7] GABRIEL K R, NEUMANN J. A note of explanation on the 1961-67 Israeli rainfall stimulation experiment [J]. J Appl Meteor, 1978, 17(4): 552-554.
- [8] GAGIN A, NEUMANN J. The second Israeli randomized cloud seeding experiment: Evaluation of the results [J]. J Appl Meteor, 1981, 20(11): 1301-1311.
- [9] 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.
- [10] OGDEN T L, JAYAWEERA K O L F. Cloud seeding effects on different daily rainfall amounts [J]. J Appl Meteor, 1971, 10(5): 1002-1005.
- [11] CHAPPELL C F, GRANT L O, MIELKE P W. Cloud seeding effects on precipitation intensity and duration of wintertime orographic clouds [J]. J Appl Meteor, 1971, 10(5): 1006-1010.
- [12] GABRIEL K R, ROSENFELD D. The second Israeli rainfall stimulation experiment: Analysis of precipitation on both targets [J]. J Appl Meteor, 1990, 29 (10): 1055-1067.
- [13] ROSENFELD D, FARBSTEIN H. Possible influence of desert dust on seedability of clouds in Israel [J]. J Appl Meteor, 1992, 31(7): 722-731.
- [14] RANGNO A L, ROBBS P V. A new look at the Israeli cloud seeding experiments [J]. J Appl Meteor, 1995, 34(5): 1169-1193.
- [15] 曾光平,肖锋.降水自然变异对人工降水效果检验的影响[J].气象科学,1983(2):79-87.
- [16] WU X H, NIU S J, JIN D Z, et al. Influence of natural rainfall variability on the evaluation of artificial precipitation enhancement [J]. Sci Chin: Earth Sci, 2015, 58(6): 906-914.
- [17] 胡志晋.层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨[J].应用气象学报,2001,12(增刊):10-13.
- [18] 申亿铭,周林,银燕.层状云中的湍流扩散系数[J].北京气象学院学报,1996(2):1-6.
- [19] 王俊,陈文选,刘文.山东省层状云系中湍流扩散系数的分布特征[J].气象,1998,24(6):22-25.

- [20] 曾光平.人工影响降雨再分配初步探讨[J].气象,1999,25(10):15-19.
- [21] 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(增刊):164-170.
- [22] 余兴,戴进,雷恒池,等.NOAA卫星云图反映播云物理效应[J].科学通报,2005,50(1):77-83.
- [23] RYAN B F, KING W D. A critical review of the Australian experience in cloud seeding[J]. Bull Amer Meteor Soc,1997,78(2):239-254.
- [24] 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.
- [25] 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):131-140.
- [26] 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.
- [27] 严采繁,陈万奎.统计评估人工增雨效果的一些问题研究[J].应用气象学报,2001,12(增刊):80-87.
- [28] 王俊,王庆,龚佃利.飞机增雨作业“8”字型航线设计探讨[J].干旱气象,2018,36(1):136-140.
- [29] 夏彭年.内蒙古地区层状云催化的条件和效果[J].人工影响天气,1998(11):33-40.
- [30] 胡志晋.人工影响天气效果的预计和检验[J].人工影响天气,1998(11):41-44.
- [31] 李红斌,周德平,濮文耀.火箭增雨作业部位和催化剂量的确定[J].气象,2005,31(10):42-46.
- [32] 陈光学,段英,吴兑.火箭人工影响天气技术[M].北京:气象出版社,2008.
- [33] 杨凡,黄明政,薛允传,等.基于高分辨率卫星影像的高炮作业点安全射界图的制作[J].气象,2008,34(4):124-126.
- [34] 李茂伦,汪晓梅,丛向春,等.基于GIS平台的火箭人工增雨作业安全射界图制作方法[J].吉林气象,2010,16(1):34-38.