

王飞,李集明,姚展予,等,2022.我国人工增雨作业效果定量评估研究综述[J].气象,48(8):945-962. Wang F, Li J M, Yao Z Y, et al, 2022. Advances of quantitative evaluation studies of artificial precipitation enhancement in China[J]. Meteor Mon, 48 (8):945-962(in Chinese).

我国人工增雨作业效果定量评估研究综述*

王 飞^{1,2} 李集明^{1,2} 姚展予^{1,2} 李德泉^{1,2} 李建军³

1 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室,北京 100081

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

3 三维时空软件股份有限公司,福州 350001

提 要: 如何评判人工播云效果一直以来是人工影响天气科研试验和业务工作的核心问题。本文总结了近年来我国人工增雨作业效果定量评估研究进展,从定量评估概念、常用方法、影响因素、存在问题等方面进行了系统性介绍。在分析各地已开展的人工增雨定量评估结果的基础上,从多方面探讨了未来作业效果定量评估技术的研究目标和发展方向,为人工影响天气作业效果评估相关科研与业务工作提供帮助与建议。

关键词: 人工增雨,作业效果,定量评估

中图分类号: P481

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.012701

Advances of Quantitative Evaluation Studies of Artificial Precipitation Enhancement in China

WANG Fei^{1,2} LI Jiming^{1,2} YAO Zhanyu^{1,2} LI Dequan^{1,2} LI Jianjun³

1 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 3D Space Software Co., Ltd., Fuzhou 350001

Abstract: How to evaluate the cloud seeding effect is a key issue of weather modification activities. This paper summarizes the quantitative evaluation studies of artificial precipitation enhancement in China in recent years. The concept, approach, impact factors, and disadvantages of quantitative evaluation are systematically introduced. The increment rate in every literature is studied intensively to give a brief review on the quantitative evaluation of weather modification operations carried out in China. Moreover, some aspects for development and improvement of evaluation technology are discussed in detail to provide help and advice for future cloud seeding evaluation studies.

Key words: artificial precipitation enhancement, operation effect by cloud seeding, quantitative evaluation

引 言

效果评估是人工影响天气科研和业务工作的重要组成部分。根据云降水和人工影响天气原理,人

工播云的效果是指受人工催化影响后,目标云的微物理过程和降水过程发生的变化。这种变化包括两个方面,一种是云的宏、微观物理参量受催化影响发生改变,称为人工播云的直接效果;另一种是催化导致地面降水发生变化,又称为播云的间接效果,也是

* 国家自然科学基金项目(41375135)、国家重点研发计划(2016YFE0201900-3)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406033)共同资助
2021年4月23日收稿; 2022年3月4日收修定稿

第一作者:王飞,主要从事气溶胶和云降水物理研究. E-mail: feiwang@cma.gov.cn

通讯作者:姚展予,主要从事云雾物理和人工影响天气研究. E-mail: yaozy@cma.gov.cn

人工影响的最终目的。效果评估的主要困难源于云-降水过程的巨大自然变差,播云带来的影响相比于自然变化往往量小力微。要想确切地描述人工增雨所带来的影响,除了定性地判断播云产生了正或负的效应,还要从定量的角度进行回答。人工增雨作业效果的定量评估是指利用一定的数学或物理方法,以地面降水为常用的检验变量,通过定量计算给出作业效果。以降水量为例, y 为人工影响后的降水量, y_0 是不进行人工影响的自然降水量,则定量评估主要关注以下两个量的计算结果,即绝对增水量(E)和相对增水率(R)。

$$E = y - y_0$$
$$R = \frac{y - y_0}{y_0} \times 100\%$$

人工催化实质上须依赖自然的云-降水过程,因此作业效果评估的重点就集中在如何将人工播云增加或减少的降水量从实际观测得到的降水量中剥离出来。

自 20 世纪 40 年代,国内外开展了大量人工播云试验。理论研究和室内外试验反复证明,在一定的自然背景条件下,对云体的某些适当部位实施有科学指导的人工催化影响,可达到局部增加降水或减少冰雹的目的。然而到目前为止,在人工播云作业实施过程中,仍存在着许多亟待解决的问题(黄美元,2011),如何科学地、定量地评估播云效果便是其中之一。美国、以色列、澳大利亚、南非、加拿大等国家在开展的大型人工影响天气试验中利用不同的方法对播云效果进行了定量评估(Krauss and Santos, 2004; Mather et al, 1997; Mielke, 1995; Sharon, 1978; Smith et al, 1963),评估结果表现出复杂的多样性,既有正效果,也有负效果或无效果。一般来说,观测得到的降水效果只有在云微物理资料上也能得到恰当的验证或解释时,才能真正令人信服(叶家东,1979)。2010 年 WMO 关于人工影响天气的声明中也指出:有相当多的证据显示在适当的条件下在云中播撒成冰性物质和吸湿性物质可以改变云的微物理结构。但部分学者对播云致使地面降水产生重要和有益变化的证据还存在一定争议。从某种意义上讲,人工影响天气的科学水平取决于效果检验的可信程度(刘晴,2013)。虽然 20 世纪 50 年代以来,国际上开展的大型人工增雨试验在作业效果评估方面做了大量有益的尝试,其中一些通过科学的试验设计和较为严谨的评估方法给出了定量增加降水结果。然而,对于每年全球范围大规模开展的人工播云活动,这些科学的、可靠的评估结果数量还远远不够。

我国自 1958 年在吉林首次开展飞机人工播云试验以来,以播云为手段的人工影响天气活动在各地广泛开展。进入 21 世纪以来,特别是近 10 年我国人工影响天气工作得到快速发展,作业规模居于世界前列。随着预报准确率、监测能力和作业装备的提升,我国人工影响天气在科学化、规范化作业方面得到明显提高。然而如何判断一次人工催化作业是否可以增加降水,以及增加了多少降水? 全年下来,某一区域开展的人工增雨作业究竟取得了多少效益? 这些都是政府和社会极为关注、亟待回答的问题。很显然,对作业效果科学、准确和定量的评估是回答这些问题的主要途径和依据。但是,由于自然云雨变化的复杂性,目前的科学技术手段还不能对成云致雨的每个环节实现全面掌握,而且现阶段的评估方法和资料仍存在一定的缺陷和误差,致使播云效果的定量评估结果具有很大的不确定性。也正因为如此,该领域取得的进展必然带动整个人工影响天气学科的发展。

本文首先介绍了国内常见的人工增雨效果检验方法,然后对我国随机化和非随机化人工增雨定量评估进展和影响定量评估结果的因素进行讨论,最后总结了目前国内人工增雨定量评估存在的一些问题并对下一步工作进行展望。

1 效果评估的概念和方法

根据云降水物理学理论和人工影响天气原理,人工增雨效果是指人工催化后的云-降水过程发生的变化。引言中提到,这种变化按影响对象可分为直接效果和间接效果。此外,在实际效果评估中,按照催化方案设计,可分为随机化试验效果评估和非随机化作业效果评估;按照评估手段,可分为统计检验、物理检验和模式检验;按照评估结果,又可分为定性评估和定量评估。本文主要对不同检验方法的定量评估研究开展介绍。

1.1 统计检验

(1) 随机化试验

随机化试验效果评估由于不依赖历史资料,多次被推荐为最可靠的检验播云作业效果的试验方案。自 20 世纪 60 年代开展的以色列随机播云试验(Gabriel et al, 1967; Gabriel, 1967),到近年来开展的美国怀俄明州冬季地形云人工增雪试验(Breed et al, 2014; Geerts et al, 2013; Pokharel et al, 2014a; 2014b),随机化试验的效果评估结论一直以来被较普遍地接

受。我国福建古田水库开展的人工增雨随机试验得出增加降水 20% 左右统计结论(曾光平等,1993)。海南于 2015—2016 年开展随机化烟炉增雨试验也得到约 11.4% 的暖云增雨作业效果(黄彦彬等,2019)。但是,由于随机化试验需要的样本量较大,而且要放弃一部分作业机会,这就导致试验开展周期长,且方法本身并不能解决自然降水变率大的问题。因此,除专题性的效果评估研究外,日常的业务作业和科学试验中很少采用随机试验方案。

(2) 非随机化试验

非随机化人工增雨作业效果评估由于可与实际业务作业一同开展,且易实施,因此在我国各级人工影响天气业务中广泛应用。非随机化作业的统计评估主要关注作业后的降水增量,通过比较未进行作业的自然降水量和作业后实测降水量的差值,运用概率论或数理统计方法定量地计算出作业效果。目前常用的统计检验评估方法包括:序列分析(无须确定影响区和对比区)、区域对比分析、双比分析、区域历史回归分析、浮动对比区(FCM)、基于聚类统计的协变量 FCM 等方法。这些方法的关键在于对作业影响区降水量期望值的估计。根据统计检验原理,在给出检验结果时必须进行显著性水平检验,即播云后实测降水量和原本估算的自然降水量之间存在差异,如果这个差异可能是由降水的自然变率造成的,就需要计算这种可能性有多大。当可能性很大时,就没理由认为人工播云改变了降水量,即作业效果不显著;而当这种可能性很小(例如小于 1% 或 5%),就有较大把握说人工播云有效,即作业效果显著。上述可能性的大小通常叫做显著性水平,用 α 表示(叶家东,1979)。

由于自然降水在时间和空间分布上存在巨大差异,这种降水的自然变率给效果评估带来很大困难,特别是当播云效果小于降水的自然起伏变化,就很难把作业效果从多种自然噪声中识别出来。如果上述提到的统计检验方法不足以客观定量地评价增雨效果,就必须进一步通过功效、准确度和灵敏度分析来选择确定统计方案(李大山,2002)。功效分析是指一定的试验期内,在一定的显著度上检出一定的试验效果的概率。功效的高低表明从自然降水变率背景上检出人工增雨效果的能力。叶家东等(1984)、曾光平(1999)、王婉和姚展予(2012)分别对随机试验和非随机试验开展过功效数值分析,研究了不同统计检验方案在试验中的检验功效。准确度指统计效果与实际增雨效果之间差值的大小,准确度的大小表征准确地反映增雨效果的能力;灵敏度

指在一定显著度 α 上检出试验效果所需的增雨效果的最低值 θ , θ 值越小灵敏度越高,也可以指在一定增雨效果下,统计检验的显著度大小,显著度越小,灵敏度越高,灵敏度的高低表征对催化效果反应的敏感程度及检验的能力。王婉(2008)利用统计模拟数值分析研究了序列分析等四类检验方案的适用性和评估结果准确度。认为影响检出功效和统计评估结果准确度、灵敏度的因子有假定增雨效果、非作业单元数、作业单元数和分层统计等,要选择合适方案进行效果检验需要对这些影响因子开展综合分析,以对存在缺陷的评估方案进行改进。

1.2 物理检验

除统计检验外,很多学者利用物理检验和数值模式等方法对增雨效果开展定量评估。人工增雨作业效果的物理检验是通过对云降水过程物理参量的系列观测,获得人工催化后应该发生的各项物理变化的证据(于丽娟,2009)。根据云和降水及其人工影响的物理机制,找出相应的物理效应,如微物理效应或宏观动力效应,作为作业效果评估的指标,进而通过试验来检验人工影响是否显著地改变这些指标(叶家东,1979)。所有这些指标,如同雨量一样,存在着很大的自然变率,受到许多因素的相互制约。要从中鉴别出人工播云的效果,除了效果特别显著外(例如云粒子相态发生改变、雷达回波参量从无到有、云的宏观特征显著变化等),一般仍需要采用数理统计的方法进行分析,因此物理检验又可确切称为物理效应的统计检验(叶家东,1979)。国内目前只有少量卫星(Dong et al, 2020; Rosenfeld et al, 2005)、雷达(赵瑞金等,2005;陈冰等,2003;Wang et al, 2021)或飞机回穿探测试验显示作业后冰晶(刘晴和姚展予,2013;王以琳和雷恒池,2003;周德平等,2004;金德镇等,2007;辛乐和姚展予,2011)或云滴粒子(Wang et al, 2019a)特征参量发生变化,而针对其他物理量指标的观测印证鲜有发现。一般来说,相较于统计检验和模式检验,基于卫星、雷达或机载观测等资料的物理检验很难实现对人工播云效果的定量评估,学者们更多的是从定性的角度分析云降水宏微观参量的变化,而且上述发生变化的物理量哪些是自然变化引起,哪些由人工播云导致,一直以来都是困扰物理检验的重要问题。

1.3 模式检验

数值模式检验是指在描述云降水过程的数值模式中增加人工播云参数化方案,通过定量预报催化

与不催化情况下云的宏、微观参量和地面降水,并与实际观测结果比较,判断作业效果。云数值模式不仅能够模拟云和降水的主要过程,而且能够描述云的多种宏、微观物理过程相互作用的整体演变过程,为人工增雨催化试验提供预期的效果。目前,国内外建立和发展的二维和三维云降水数值模式,尽管尚不十分完善,但通过人工催化模拟试验,可以了解云和降水过程中哪个环节(链)发生了变化,还可以定量地计算出具体的变化值(率)。如刘卫国等(2021)利用数值模式模拟河北一次冷云催化过程,结果显示催化后 3 h,作业影响区呈先减雨后增雨的分布特征,平均增雨率约 1.1%。何晖等(2012)、查思佳等(2020)对某重大活动开幕式的人工催化作业效果进行数值模拟,利用模式结果定量研究了播云带来的云微物理结构和降水的变化。一般来说,模式检验结果是否可信很大程度上依赖于模式自身对云-降水过程模拟的准确性。随着近年来数值模式越发成熟,特别是云微物理参数化方案的精细度不断提高,模式检验在刻画人工催化的微物理效应、动力效应以及定量评估播云效果方面正发挥越来越重要的作用。

2 我国人工增雨定量评估研究进展

2.1 随机化人工增雨试验的定量评估

我国人工增雨定量评估是从福建古田水库的随机化增雨试验开始的。1975—1977 年的阶段性试验结果显示,62 次随机试验的平均增雨率可达 40%~78.7%,显著性水平 $\alpha < 0.0025$ (叶家东和程克明,1979)。而利用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)对 12 年来(1975—1986 年,共 244 次随机作业)的综合评估结果显示,平均相对增雨率约 20%,显著性水平 $\alpha < 0.05$ 。其中混合云和层状云催化效果较好,积状云催化效果不显著,而不同的作业工具(三七高炮和小火箭)催化效果差异不大。并通过雷达回波、雨滴谱、雨水中 Ag^+ 含量和数值模拟分析从侧面验证了评估结果(叶家东和程克明,1979;曾光平和方仕珍,1986;曾光平等,1989;1991;1993;1997)。此后,在试验研究的基础上又针对水库蓄水和发电的需要,开展了为期 6 年(1989—1996 年)的非随机化效果检验应用研究,区域回归和双比分析结果显示增雨效果达 25.17%~26.73%(均通过显著性水平检验),增加的降水使得下游古田水库入库流量和水

位明显增加(曾光平等,1997)。除了开展对冷云催化的效果评估外,黄彦彬等(2019)利用布设在海南昌江的 4 套地基烟炉开展针对暖云的随机化效果检验,结果显示 34 个样本的平均增雨率约为 11.4%。虽然利用 TITAN(Thunderstorm Identification Tracking Analysis and Nowcasting)系统追踪催化样本显示作业后各项雷达回波参量普遍增加,对结果起到一定支撑作用,但结果并未通过显著性水平检验。

2.2 非随机化人工增雨作业的定量评估和影响因素

第一节中提到,现阶段我国人工增雨仍以非随机化试验和业务作业为主,针对作业效果定量评估也大多是在非随机化人工增雨的基础上开展的。评估方法以统计检验应用最为广泛,在一些重大服务和典型过程中也开展了物理检验和模式检验的定量评估。然而,影响定量评估结果的因素有很多,研究人员在评估方法选取、雨量资料应用、影响区和对比区判别、催化剂用量等方面开展了大量研究工作。

(1) 统计变量的选择

我国已开展的人工增雨定量评估大多以降水量为评估对象,只有少量的研究以卫星参数(林丹和王维佳,2020)或雷达回波(王婉等,2014;汪玲等,2015)为统计变量。当以雨量为评估对象时,作业时段的雨量一般采用小时雨量或日雨量。选择小时雨量主要考虑作业的充分性,但小时雨量的自然变率太大,统计检验的区域相关性较差;而选择日雨量作为统计变量,其自然变率比小时雨量自然变率小,因此区域相关性更好,但雨量统计时段未必涵盖持续性作业(姚展予,2016)。结合实际评估时段,对应的历史期雨量以日雨量和月雨量为主,也有研究选择旬雨量(李宏宇和王华,2006)或候雨量(刘晴,2013;李宏宇等,2014)进行评估。周德平等(2006)利用区域回归方法评估 1992—2004 年 6—8 月辽宁地区东北冷涡云系人工增雨效果,结果显示飞机、地面火箭的相对增雨率平均约为 22.44%,且统计结果具有 0.05 以上的显著性水平。但是,由于采用过程雨量为统计变量,且对比区的选取存在一定的主观性,这样会很大程度上高估/低估统计结果。李宏宇等(2014)将历史 30 年的旬降水量作为拟合样本,以单站降水量的四次方根变换作为统计变量分析 2004—2010 年北京汛期期间的平均增雨作业效果为 21.3%,且随着样本的逐年增加,评估结果的显著性水平达到 $\alpha = 0.01$ 。

(2) 评估方法的选取

评估方法的选取对人工增雨定量评估的结果存在很大的影响。刘晴(2013)在研究中对比四种常用的统计检验评估方法,认为序列分析、区域对比分析和双比分析均不是北京汛期人工增雨效果评估的最优方案;而尝试多种统计变量的区域历史回归评估结果的显著性最好。王伟健(2017)、Wang et al (2019b)采用改进后的区域历史回归方法,分析了2008—2014年冬季江西地区71次飞机增雨作业效果。结果显示,剔除异常年份降水数据后,目标区平均增雨率为17.3%,下游区域平均增雨效率为21%,结果均通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验。此外,结合雷达回波追踪分析,增雨效果可影响到下游150 km范围。除了前面提到常用的四类统计方法外,研究人员利用统计理论发展了多种非随机区域历史回归试验方法。例如提出的基于聚类的浮动对比区统计检验方法(CA-FCM方法),采用聚类分析技术有效改善了对比区和影响区相关性,提高了回归分析的灵敏度水平(房彬,2004)。翟羽等(2008)采利用该方法对河南4月10次飞机增雨作业进行评估,得到平均增雨率为9.8%,但个别作业存在负效果。房彬(2004)、房彬等(2005;2008a)利用CA-FCM方法和其他几种检验方案评估河南地区的飞机增雨作业效果,结果显示以降水量和整层大气可降水量为协变量的CA-FCM方法评估效率最好,平均相对增雨率为15.3%~30%,且均通过显著性检验。此外,吴香华(2014)、吴香华等(2015)基于现代统计学理论,采用统计数值模拟的方法分析了降水自然变率对人工增雨效果评估的影响。通过副区的合理划分、协变量的选取和控制降水自然变率的影响后,得到吉林省1997—2007年4—7月随机抽取的35个作业日增雨效果为0~30%(平均为11.95%),且和实测雨量大小没有直接联系。随着大数据和机器学习等领域的发展,越来越多的统计检验算法(王伟健等,2018)会应用到人工增雨的定量评估研究中。

人工增雨作业效果定量评估的另一种方式是数值模拟和统计检验结合,通过建立非作业时段实测雨量和模式雨量的经验公式,利用经验公式订正作业时段的模式预报雨量为未实施人工影响天气作业的应有雨量,其与实测雨量的差值为作业效果。颜文胜等(2006)利用热带所数值预报产品,得出2002—2004年广东地区的地面作业平均增雨效率约为21.7%,且通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验。但由于采用的是24小时降水预报产品,因此评

估结论存在一定的局限性。除了针对雨量的统计分析外,还可以通过对雷达回波的分析,采用物理量分析和统计检验相结合的方式定量评估作业效果。例如针对天津地区的一次对流云地面增雨作业,王婉等(2014)利用TREC(tracking radar echo by correlations)方法追踪催化回波,得到动态的影响单元和对比单元,在计算相关雷达回波参量(最大回波强度、回波顶高、整层最大回波强度)变化的同时,采用双比法分析降雨率(由Z-R关系得到),得到此次作业的增雨效果约为7.69%,显著度检验值为0.043。

(3) 影响区和对比区的确定

如何科学的确定作业影响区是开展人工增雨定量评估的关键问题。目前常用的四类统计检验方法,除序列分析外,其余三种方法均需要确定作业影响区和对比区。影响区的计算一般根据实际作业情况(例如地面作业可近似认为是点源或线源播撒,飞机作业可近似认为是线源或面源播撒),通过给定催化剂的浓度阈值,结合催化层的风向风速等进行综合判断。王以琳等(2012)基于催化剂扩散传输模式(申亿铭和陈吉航,1986),将作业后 Ag^+ 浓度 $\geq 10 \text{ L}^{-1}$ 的区域确定为作业影响区,采用区域历史回归方法分析山东两次飞机增雨作业相对增雨率分别为8.27%和11.83%,且均通过 $\alpha=0.01$ 显著性水平检验。对比区的选择应满足:①不受催化影响;②与影响区面积、地形和天气系统相仿;③雨量站分布数量近似等条件(叶家东和范蓓芬,1982)。但是实际人工增雨作业往往选择最有利于降水或自然发展最旺盛的云区开展,因此在效果评估时对比区的划分也存在一定的主观因素。为解决这个问题,研究人员在效果评估中提出了多种区域划分解方案,例如“移动目标区”方法(夏彭年,1998)、“基于聚类的浮动对比区”方法(房彬等,2008a;2008b)、“非固定目标区增雨评估法”等(段英等,1998)。这些方法一定程度上解决了相关性差、功效偏低等问题,但仍存在很大的改进空间。

(4) 作业方式和催化剂用量

除了上述影响定量评估结果的因素外,有学者还从作业方式、催化剂用量等方面开展研究。孙海燕等(2005)利用三维云模式对北京夏季一次地面火箭增雨作业进行评估,得出增雨效果为26.2%,且作业时机和发射仰角对增雨效果影响很大。方夏馨等(2015)利用区域对比分析法对2014年云南地区的地面增雨效果分析显示,8次作业过程各大水库的平均相对增雨率约为18.75%,且作业用弹量与作业影响区相对增雨量呈正相关。王婉和姚展予

(2009)利用区域历史回归方法对 2006 年北京 5—9 月 43 个增雨日统计分析发现,平均增雨率约为 13%,根据催化情况对作业日进行分类统计,发现催化不充分和过量播撒会导致不同程度的减雨(12%~49%)。此外,对我国甘肃(樊晓春等,2007;杨永龙等,2006)、新疆(李斌等,2018;李健丽等,2018;郑博华等,2019)等地开展的人工增雪评估结果显示,作业效果可达 9%~40%,且具有较好的显著性水平。除了常见的飞机和地面高炮、火箭和烟炉作业外,辽宁和甘肃等地区偶有用气球携带 AgI 焰弹的方式开展人工增雪作业。孙立德等(2019)分析了不同天气形势下辽宁地区气球焰弹的增雪效果,认为在适合的天气条件下,气球焰弹的相对增雪率可达 28.08%。钱莉等(2006)利用多种方法评估 2002—2004 年甘肃武威地区气球焰弹的平均增雪效率可达 40.2%,所有评估结果均通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验。

此外,从过往的研究可以看出,相比于长时段多

次人工增雨作业,针对单次增雨过程开展的个例研究往往会得到较大的增雨率值。例如 2016 年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》(姚展予,2016)中利用区域历史回归法对云南和安徽开展的一次对流云地面火箭增雨作业的评估结果显示,相对增雨率分别达到 160.18% 和 80.95%。翟晴飞等(2017)利用区域历史回归方法得到辽宁地区的一次飞机、火箭增雨效果达 119.43%,且通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验。贾烁和姚展予(2016)对江淮地区一次对流云地面作业效果统计发现,相对增雨率达 65.18%。李红斌等(2016)对催化云体的分钟降水量计算发现,作业后 30~50 min 内的相对增雨率为 49%。祝晓芸(2016)、祝晓芸和姚展予(2017)对江西两次地面火箭增雨个例研究发现,相对增雨率分别为 163.58% 和 256.58%,均通过显著性检验。但采用日雨量和小时雨量为统计变量,分析结果则存在较大差异。

图 1 为截止目前我国开展的人工增雨定量评估

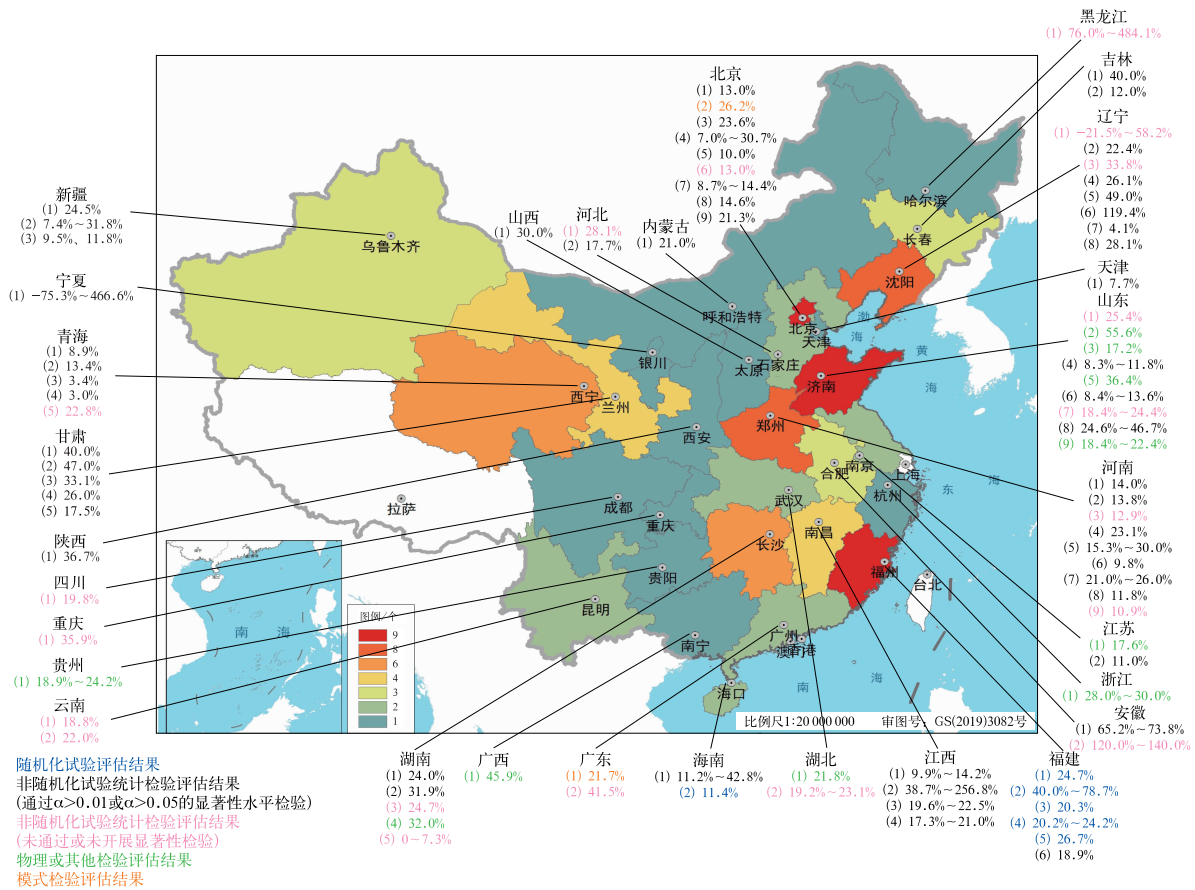


图 1 我国人工增雨定量评估开展情况
(填色表示各地区开展的作业效果定量评估研究数量,百分比数字代表相对增雨率结果,数据来源于已发表文献)
Fig. 1 The result of quantitative assessments of artificial precipitation in China
(Colors indicate the number of published literatures in each province and the percentage represents the result of enhancement rate, data from published literature)

表 1 各省人工增雨定量评估结果

Table 1 Quantitative assessments of artificial precipitation in each province

地区	编号	作业方式	评估方法	增雨率/%	来源
北京	1	火箭、飞机	统计	13	秦长学等(2005)
	2	火箭	模式	26.2	孙海燕等(2005)
	3	高炮、火箭、飞机	统计	23.6	李宏宇和王华(2006)
	4	高炮、火箭	统计	6.99~30.68	李书严等(2006)
	5	高炮、火箭、飞机	统计	10	王婉(2008)
	6	高炮、火箭、飞机	统计	13	王婉和姚展予(2009)
	7	高炮、火箭、飞机	统计	8.7~14.4	王婉和姚展予(2012)
	8	高炮、火箭、飞机	统计	14.62	刘晴(2013)
	9	高炮、火箭、飞机	统计	21.3	李宏宇等(2014)
天津	1	高炮、火箭	统计	7.69	王婉等(2014)
河北	1	飞机	统计	28.1	游景炎等(1994)
	2	飞机	统计	17.67	游景炎等(1994)
山西	1	高炮、火箭	统计	30	谢继民等(2002)
内蒙古	1	飞机	统计	21	张自国等(2008)
辽宁	1	飞机	统计	-21.53~58.2	耿素江等(2003)
	2	火箭、飞机	统计	22.44	周德平等(2006)
	3	火箭	统计	33.8	刘云辉等(2008)
	4	火箭	统计	26.1	王吉宏等(2009)
	5	火箭	统计	49	李红斌等(2016)
	6	火箭、飞机	统计	119.43	翟晴飞等(2017)
	7	飞机	统计	4.1	房彬等(2018)
	8	气球焰弹	统计	28.08	孙立德等(2019)
吉林	1	飞机	统计	40	汪学林和刘健(1992)
	2	飞机	统计	11.95	吴香华(2014)、吴香华等(2015)
黑龙江	1	飞机	统计	75.99~484.14	李冬楠等(2019)
江苏	1	火箭	物理	17.6	段培法等(2013)
	2	火箭	统计	11	王佳和陈钰文(2015)
浙江	1	火箭	统计	28~30	陆耀辉和章莹菁(2008)
安徽	1	火箭	统计	120~140	蒋年冲等(2006)
	2	高炮、火箭	统计	65.18~73.82	贾烁(2016)、贾烁和姚展予(2016)
福建	1	高炮	随机试验	24.7	福建省命委员会气象局(1975)
	2	高炮	随机试验	40~78.7	叶家东(1979)
	3	高炮	随机试验	20.3	叶家东等(1981)
	4	高炮、火箭	随机试验	20.21~24.16	曾光平和方仕珍(1986)、曾光平等(1991;1993)、冯宏芳等(2019)
	5	高炮	随机试验	26.73	曾光平等(1997)
	6	高炮	统计	18.87	冯宏芳等(2010)
江西	1	高炮、火箭	统计	9.9~14.2	吴万友等(2008)
	2	火箭	统计	38.7~256.8	祝晓芸(2016)、祝晓芸和姚展予(2017)
	3	飞机	统计	19.59~22.5	王伟健(2017)
	4	飞机	统计	17.3~21	Wang et al(2019b)
山东	1	飞机	统计	25.42	王以琳等(2000)
	2	高炮、火箭	物理	55.6	高树俊(2003)
	3	高炮、火箭	物理	17.16	王化玲等(2010)
	4	飞机	统计	8.27~11.83	王以琳等(2012)
	5	高炮、火箭	统计	36.4	宁瑞斌(2012)
	6	火箭	统计	8.4~13.6	郭红艳等(2014)
	7	高炮、火箭	物理	18.38~24.44	宁瑞斌等(2016)
	8	高炮、火箭、烟炉	统计	24.6~46.7	丁明等(2016)
	9	高炮、火箭	物理	18.4~22.4	王晓立等(2018)

注:编号与图 1 中对应。

Note: Reference numbers are one-to-one correspondence with Fig. 1.

续表 1

(Continued)

地区	编号	作业方式	评估方法	增雨率/%	来源
河南	1	高炮	统计	14	黄庚等(1996)
	2	飞机	统计	13.8	叶家东和李铁林(2001)
	3	高炮、火箭	统计	12.9	张玉峰等(2004)
	4	飞机	统计	23.1	房彬(2004)、房彬等(2005)
	5	飞机	统计	15.3~30	房彬等(2008a)
	6	飞机	统计	9.8	翟羽等(2008)
	7	飞机	统计	21~26	房彬等(2008b)
	8	高炮、火箭、飞机	统计	11.841	邵振平和杜春丽(2014)
	9	高炮、火箭	统计	10.9	徐朝晖(2019)
湖北	1	火箭	物理	21.8	望胜玲和许焱(2013)
	2	火箭	统计	19.2~23.1	杜兴无和刘少霞(2020)
湖南	1	高炮、火箭	统计	24	唐林等(2008)
	2	火箭	统计	31.9	张中波(2010)
	3	火箭	统计	24.7	张中波和唐林(2010)、 邓战满和张中波(2014)
	4	飞机	物理	32	李琼等(2017)
	5	高炮、火箭	统计	0~7.25	汪玲等(2015)
广东	1	高炮	模式	21.7	颜文胜等(2006)
	2	火箭	统计	41.5	郭青等(2018)
广西	1	飞机	物理	45.88	韦增岸等(2019)
海南	1	火箭	统计	11.2~42.8	黄彦彬等(2006)
	2	烟炉	随机试验	11.4	黄彦彬等(2019)
重庆	1	飞机	统计	35.93	廖向花等(2014)
四川	1	飞机	统计	19.82	林丹和王维佳(2020)
贵州	1	飞机	物理	18.9~24.2	李玮等(2007)
云南	1	高炮、火箭	统计	18.75	方夏馨等(2015)
	2		物理	22	文道平(2018)
陕西	1	飞机	统计	36.7	贾玲等(2003)
甘肃	1	气球焰弹	统计	40	钱莉等(2006)、杨永龙等(2006)
	2	火箭	统计	47	杨永龙等(2006)
	3	高炮、火箭	统计	33.1	樊晓春等(2007)
	4	高炮、火箭	统计	26	钱莉等(2006)
	5	高炮、火箭、烟炉	统计	17.5	程鹏等(2021)
青海	1	飞机	统计	8.86	张阳等(2006)、张阳(2006)
	2	火箭	统计	13.4	康晓燕等(2017)
	3	高炮、火箭、烟炉	统计	3.39	张令振和祁小娟(2018)
	4	高炮、火箭、烟炉	统计	2.96	胡德奎等(2019)
	5	火箭	统计	22.8	康晓燕等(2019)
宁夏	1	飞机、火箭、高炮	统计	-75.33~466.57	常倬林等(2021)
新疆	1	飞机	统计	24.5	李斌等(2018)
	2	火箭、烟炉	统计	7.44~31.8	李健丽等(2018)
	3	飞机	统计	9.5、11.75	郑博华等(2019)

结果,可以看出非随机化试验和业务作业仍占主导,约 81%的研究结果得出相对增雨率在 2%~35%,个别研究得出负的增雨效果。有超过 92%的定量评估采用了统计检验方法,其中通过 0.01 或 0.05 显著性水平检验的研究约占 77%。大多数的统计检验以小时雨量或日雨量为评估对象,少量研究以旬雨量或月雨量为评估对象。约有 50%的研究在评估过程中考虑了按天气系统分型或针对不同云条件进行分类。长时段、多样本的统计评估往往比针

对单个过程的评估结果更稳定、更集中。

3 存在问题

人工增雨效果的定量评估在为农服务、改善生态环境和防灾减灾中具有重要意义,科学、准确的评估作业效果是政府和公众对人工影响天气活动支持和投入的依据。但由于评估方法、观测资料等限制,目前在相关研究工作中仍存在一些亟待解决的问

题。这些问题总体上可归纳为两类,一是评估方法自身的科学性问题,二是评估过程中所采用的技术路线问题。

3.1 评估方法的科学性问题

关于模式、统计和物理检验三类评估方法的优缺点和适用性已在本文第一节进行过系统介绍,此处不再赘述。而定量评估常用的几类统计检验方法,由于在评估过程中采用了一定的假设条件,评估结果需要进行显著性分析和功效计算综合判定。例如序列分析须假设作业影响区自然降水量在历史上是平稳的时间序列,但由于天气形势不同或局地气候条件变化,会导致估计自然降水量时误差较大且灵敏度较低。区域对比分析由于假设自然雨量的空间分布在统计上是均匀的,而在实际评估过程中由于地形等条件的差异,使得假设往往难以成立。双比分析在应用中须假设自然降水情况下作业时段影响区与对比区的降水量比值与非作业期(历史期)的对应比值相同,这与序列分析类似,自然降水的巨大变差会导致假设不成立,评估结果的显著度较低。区域控制模拟试验由于主观的选择某个或某些样本作为相似样本,存在一定的人为主观性。区域历史回归分析的最大困难在于作业影响区与对比区的关系缺乏稳定性,导致评估结果稳定性较差。但如果对比区选择得当,样本数量足够多,相比以上常见的统计检验方法,该方法仍具有较高的评估功效。因此区域历史回归分析也是国内外人工增雨定量评估最常用的方法之一。

此外,采用科学评估方法的同时需要采用正确的评估资料,很多研究存在评估时段使用的降水量资料时间分辨率与历史期的不同,例如作业期使用的小时雨量,而历史样本用的日雨量或月雨量,这就造成作业期和历史期雨量数据无法直接进行比较。正确的做法是若选择小时雨量为评估变量,则对应的史期雨量为小时雨量;以日雨量为评估变量,则对应的历史期雨量应选择日雨量。这样建立的统计关系应用到实际评估中才具有可比性。还需要注意的一点是建立历史降水量数据集时,应尽量选择未开展人工增雨作业的降水过程,这样才能保证用来进行检验和评估的历史样本不受催化作业影响。

3.2 评估过程中所采用的技术路线问题

除了采用科学的评估方法外,要得到更为精确

的定量评估结果,还需要选择较为恰当的技术路线,保证评估过程中每个步骤客观、完整。特别是对作业样本的合理性、评估区域的选取以及评估结果的客观性和显著度,要进行专门分析,给出相应的分析结果。对国内已开展的定量评估调查发现,很多研究的技术路线都存在一定问题。例如采用统计检验方法开展长时段的定量评估时,对每次作业的实际情况不了解;在确定影响区和选择对比区时,存在较强的主观性;对得到的评估结果未进行显著度和不确定性讨论等。以下对上述存在问题进行逐一讨论。

(1) 作业合理性

研究表明,过往开展业务作业型人工增雨由于种种原因(例如空域限制导致作业时机或播云部位未按照预设方案开展等),存在大量的作业不合理或无效作业的情况,而在评估过程中把这些作业纳入到统计样本中很显然是不合适的。因此,应对每次作业过程开展合理性检验。一般来说,实施一次成功的人工影响天气作业需要满足以下条件:即对天气形势和作业潜力的科学研判、对作业条件的精密监测以及对作业目标实施适量催化。然而,在实施过程中想要达到定时、定点、定量的作业目的往往需要多部门的努力和配合,一旦其中某个环节出现问题,就会导致作业效果不理想,或未达到预期。要实现作业效果的全面、客观评估就要对整个作业过程进行回溯,判断作业是否科学合理。特别是针对物理检验和统计检验,需要从人工增雨作业条件、时机和部位的把握,催化剂和作业方式的选取等方面对作业样本进行合理性分析,剔除存在明显不合理现象的作业样本,对满足作业合理性要求的样本进行作业效果的定量评估才有意义。

(2) 影响区和对比区

有研究表明,催化剂在云中的作用时间长达数小时,在这期间可沿风向向下游传播较远的距离(Wang et al, 2019b),催化剂扩散和传输所经过的范围都可以认为是作业影响区。然而,如何科学计算作业影响区的大小是个极为复杂的问题。影响区范围的估算差异会给作业效果的最终评估带来很大的不确定性,甚至出现相反的评估结果(叶家东等, 1998)。一般认为,在试验中播撒催化剂的同时增加相应的示踪剂,通过对示踪剂的跟踪来判断影响区是一种较为精确的方法,但在实际操作中不容易实现。此外通过给定催化剂的浓度阈值,利用催化剂

扩散传输模型计算的作业影响区相对较为客观,近年来在很多人工增雨效果评估工作中得到应用(周毓荃和朱冰,2014;秦彦硕等,2017)。

对于非随机化人工增雨作业和试验,如何确定对比区对评估结果显得至关重要。一种效果检验方案能否成功很大程度上取决于对比区选择是否合理,选择不同的对比区会使得定量评估的最终结果存在很大差异。叶家东和范蓓芬(1982)提出了对比区的基本选取原则,但过往研究中确定影响区和对比区的最大问题就是带有一定的主观性,无论是采用物理检验还是统计检验方法,都存在类似的问题。例如在实际操作过程中,根据天气条件研判,往往选择最有利的时空窗区进行作业,这就造成影响区的降水量或回波强度很可能高于对比区,也就是说在选择作业目标时加入了主观判断,导致利用区域对比等方法时存在一定的“假效果”。有学者在确定对比区方面提出了聚类分析和浮动对比区的方法(房彬,2004;翟羽等,2008),提高了区域雨量的相关,一定程度上降低了对比区选择的主观性。此外,由于我国作业需求的原因很难找到合适范围的区域从未开展过人工播云作业,因此在确定对比区或建立历史期雨量数据集时,存在较大的难度。这也是现阶段很多学者利用区域历史回归等统计检验方法来定量评估增雨效果面临的主要问题之一。

(3)非随机化效果检验的显著性和功效

第一节中提到,现阶段我国人工增雨以非随机化业务作业为主,采用统计检验方法开展定量评估需要对降水的时空分布进行假设,即用一种概率分布来表征自然雨量,例如正态分布。如果实际雨量与正态分布偏离较大,通常采用变量变换的方式设法将样本正态化,例如取对数、多次方根等,这就需要对其显著性水平进行讨论。从过往的研究来看,样本数量是影响评估结果是否通过显著性检验的重要因素之一。大量的评估样本往往会增加评估结果的显著性水平。但是,即使未通过显著性水平检验,评估结果仍具有一定的参考价值。除此之外,由于降水在时间和空间分布上存在巨大差异,导致统计评估过程中,灵敏度、功效和准确度不高,对自然降水统计推断存在一定误差,甚至出现“假效果”,影响效果检验的客观性和科学性。提高评估方法灵敏度、功效和准确度的方法之一是采用经典的统计理论,要求自然雨量服从某一已知的概率分布,而在实际操作中很难达到(Schickedanz and Huff,1971)。

近年来又发展了统计数值模拟试验方法,又被称为复随机化试验法(Kemphorne and Doerfler,1969),这种方法不要求统计变量服从某种概率分布,比通常的参量性检验有更强的稳健性,因此更适于被用来研究功效、准确度和灵敏度问题(王婉,2008;王婉和姚展予,2012;叶家东等,1984)。

4 结论与展望

我国自20世纪50年代开展人工影响天气活动以来,人工影响天气相关的数值模式、观测仪器和催化技术得到飞速发展,相应的条件预报、监测识别和作业能力显著提高。然而,在科学、规范和定量的评估作业效果方面,仍然存在诸多问题。虽然面临诸多困难,近年来研究人员在作业效果定量评估方面仍做了一些尝试和创新性的工作。包括组织人工增雨随机化试验,累积试验样本,定量评估播云效果;加强非随机化业务作业的方案设计和规范化作业,提高效果检验的客观性和科学性;改进原有统计检验方案,提高功效和显著性水平,探索定量评估新方法;发展数值模式评估和对实际催化的仿真模拟能力,将模式结果和实测资料对比验证,综合评估作业效果等。

通过上述人工增雨作业效果定量评估研究的梳理,我们发现影响定量评估结果的因素有很多,例如与是否开展作业合理性分析有关,选择较为科学、合理的作业过程,往往会增加评估结果的可信度;与影响区和对比区的确定有关;与统计变量类型有关,例如常见的降雨量,以及水汽含量、雷达回波强度和积分含水量等;与统计变量的选取有关,例如小时雨量、日雨量、候雨量、月雨量;与选取的评估对象的样本量有关,典型作业个例评估结果往往存在较大的增雨率或负效果,而长时间序列统计分析结果相对稳定。在实际评估中,需要对上述影响因素进行多方面考虑,这样得到的结果才具有更好的客观性。

针对现阶段我国人工增雨定量评估研究现状,未来的研究重点主要集中在以下几方面:

(1)开展长时间序列的随机化效果检验研究。由于随机试验作为国内外人影专家和统计学家最为推崇的试验方案,一直以来在国内开展较少。因此,鼓励选择观测条件较好的试验区,开展长时段、有科学设计的随机化人工播云试验。其结果可为国内效果定量评估业务提供有利参考。

(2)优化统计检验方法,提升评估结果的科学性和客观性。针对非随机化播云的定量评估,要求尽可能多的累积样本数量,针对每次作业样本开展合理性分析,得到的评估结果须进行显著性检验并给出显著性水平。除采用常见的雨量资料外,还可以增加样本类型来提高评估结果的可信度,例如某地区常年开展对流云地面作业,可基于回波单体特征参量的历史资料开展统计评估。此外,在传统统计检验理论的基础上,积极探索新的评估方法,减少评估过程的假设条件和主观因素,提高效果检验的科学性和客观性。

(3)多种检验方式相互验证、有机结合。大量研究表明,要取得更为客观的人工增雨定量评估结果,除进行统计检验外,还需要结合数值模式和物理检验,对作业效果进行综合分析,这也是人工增雨作业效果检验的发展方向(王婉,2008)。特别是随着对云降水的复杂性和多尺度性认识的深化以及探测技术的发展,模式检验和物理检验在人工影响天气作业效果检验中的权重将逐步加大(张良等,2006)。针对长时段、多样本的定量评估,可采用统计检验和物理检验相结合的方式;而针对单个过程的定量评估,可采用模式模拟实际催化过程与物理观测播云响应相结合的方式。

近年来国内外云降水和人工影响天气学者在这方面做了一些有益的尝试,利用多元观测资料和数值模拟手段支撑评估结论。笔者倾向于将上述几种方法相互结合,因地制宜地开展科学、合理、客观的集合评估,其结果可有效支撑最终的定量评估结论,并为后续开展的作业效益评估提供参考。

总之,人工增雨效果评估特别是定量评估它是人工影响天气的核心科技问题,在现阶段降水的定量预报准确率仍然偏低,甚至基于卫星雷达资料的定量降水估测仍未达到人工增雨定量效果评估可用程度的情况下,如何有效地综合应用上述检验方法并积极采用大数据、人工智能等新技术是未来我国人工增雨定量效果评估研究的重要方向。

参考文献

常倬林,姚展予,曹宁,等,2021.宁夏增雨效果评估及个例防雹效果分析[M]//桑建人.六盘山地形云研究论文集.北京:气象出版社. Chang Z L, Yao Z Y, Cao N, et al, 2021. Evaluation of artificial precipitation enhancement and case study of hail suppression

effect in Ningxia[M]// Sang J R. Proceedings of Orographic Cloud Study in Liupan Mountain. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).

陈冰,张深寿,冯晋勤,等,2003.新一代天气雷达在人工增雨中应用的初步研究[J].应用气象学报,14(S1):187-192. Chen B, Zhang S S, Feng J Q, et al, 2003. Primary study of application of new Doppler weather radar to artificial precipitation[J]. J Appl Meteor Sci, 14(S1):187-192(in Chinese).

程鹏,陈祺,蒋友严,等,2021.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,40(4):866-874. Cheng P, Chen Q, Jiang Y Y, et al, 2021. Effect evaluation of artificial rainfall enhancement in the Shiyang River Basin of Hexi Corridor in the latest 10 years[J]. Plateau Meteor, 40(4):866-874(in Chinese).

邓战满,张中波,2014.几种人工增雨效果评估方法的应用与研究[J].安徽农业科学,42(9):2675-2676. Deng Z M, Zhang Z B, 2014. Application and study of several ways to evaluate the effect of artificial precipitation[J]. J Anhui Agri Sci, 42(9): 2675-2676(in Chinese).

丁明,崔兆韵,徐学义,等,2016.黄前水库流域农业抗旱人工增雨试验效果检验[J].中国农业信息,(21):114-115. Ding M, Cui Z Y, Xu X Y, et al, 2016. Evaluation on agricultural drought resistance and artificial precipitation enhancement in Huangqian Reservoir Basin[J]. China Agr Infor, (21): 114-115(in Chinese).

杜兴无,刘少霞,2020.郧西县烟叶主产区一次人工增雨作业分析[J].现代农业科技,(12):207-211. Du X W, Liu S X, 2020. Analysis on an artificial precipitation enhancement operation in tobacco planted area in Yunxi County[J]. Modern Agri Sci Tech, (12):207-211(in Chinese).

段培法,孙建印,吴世明,等,2013.徐州市人工增雨作业效果评估[C]//第30届中国气象学会年会 S14 人工影响天气与大气水资源开发利用.南京:中国气象学会:169-173. Duan P F, Sun J Y, Wu S M, et al, 2013. Effect evaluation of precipitation enhancement in Xuzhou[C]//30th Annual Conference of Chinese Meteorological Society: Weather modification & development and utilization of atmospheric water resource (S14). Nanjing: Chinese Meteorological Society:169-173(in Chinese).

段英,赵亚民,赵利品,1998.飞机人工增雨非固定目标作业评估方法[M]//人工影响天气(十一).北京:气象出版社:76-79. Duan Y, Zhao Y M, Zhao L P, 1998. Aircraft artificial rainfall operations assessment of non-fixed target[M]// Weather Modification (Eleven). Beijing: China Meteorological Press: 76-79(in Chinese).

樊晓春,丁瑞津,王晓平,等,2007.陇东黄土高原冬春季人工增雪效果分析[J].干旱区研究,24(1):103-107. Fan X C, Ding R J, Wang X P, et al, 2007. Analysis on the effect of artificial snowfall in the Longdong Loess Plateau in winter and spring[J]. Arid Zone Res, 24(1):103-107(in Chinese).

房彬,2004.基于聚类的浮动对比区历史回归人工增雨效果统计检验

- 方法研究与应用[D].南京:南京气象学院. Fang B, 2004. Evaluation the efficiency of non-randomized artificial precipitation enhancement: Cluster analysis based floating cwnontrol historical regression method (CA-FCM)[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Meteorology(in Chinese).
- 房彬,肖辉,班显秀, 2008a. CA-FCM 方案与其它几种人工增雨评估方案的比较[J]. 气象科技, 36(5):612-621. Fang B, Xiao H, Ban X X, 2008a. Comparison between CA-FCM and some other methods for evaluating precipitation enhancement effectiveness [J]. Meteor Sci Technol, 36(5):612-621(in Chinese).
- 房彬,肖辉,班显秀,等, 2008b. 一次人工增雨作业中 CA-FCM 与其他评估方案的比较研究[J]. 气象与环境学报, 24(4):13-18. Fang B, Xiao H, Ban X X, et al, 2008b. Comparison between CA-FCM and other precipitation enhancement effect evaluation methods on cloud seeding operation[J]. J Meteor Environ, 24(4):13-18(in Chinese).
- 房彬,肖辉,胡晓姣,等, 2018. 辽宁省一次飞机增雨作业效果统计检验和物理检验分析[C]//第 35 届中国气象学会年会 S16 人工影响天气理论与应用技术研讨. 合肥:中国气象学会:29-40. Fang B, Xiao H, Hu X J, et al, 2018. Statistical test and physical test on the evaluation of a aircraft cloud seeding in Liaoning, China[C]//35th Annual Conference of Chinese Meteorological Society: Discussion on theory and application technology of weather modification (S16). Hefei: Chinese Meteorological Society:29-40(in Chinese).
- 房彬,肖辉,王振会,等, 2005. 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, 28(6):739-745. Fang B, Xiao H, Wang Z H, et al, 2005. Application of cluster analysis to the statistical assessment of the effect of artificial rain enhancement [J]. J Nanjing Inst Meteor, 28(6):739-745(in Chinese).
- 方夏馨,时永祥,孙玲,等, 2015. 2014 年昆明市常态化人工增雨效果区域对比分析[J]. 安徽农业科学, 43(25):194-196. Fang X X, Shi Y X, Sun L, et al, 2015. Regional comparative analysis of regular artificial precipitation enhancement effect in Kunming in 2014[J]. J Anhui Agri Sci, 43(25):194-196(in Chinese).
- 冯宏芳,林文,曾光平, 2019. 福建省古田水库人工增雨随机回归试验回顾及展望[J]. 海峡科学, 5:21-29. Feng H F, Lin W, Zeng G P, 2019. Review and prospect of random artificial precipitation enhancement experiment in Gutian, Fujian Province[J]. Straits Sci, 5:21-29(in Chinese).
- 冯宏芳,隋平,蔡英群,等, 2010. 蓄水型人工增雨效果检验[J]. 气象科技, 38(4):510-514. Feng H F, Sui P, Cai Y Q, et al, 2010. Effectiveness evaluation of precipitation enhancement for water storage[J]. Meteor Sci Technol, 38(4):510-514(in Chinese).
- 福建省革命委员会气象局,等, 1975. 福建省一九七四年八、九月份人工降水效果的统计分析[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1:137-151. Fujian Meteorological Service, 1975. Statistical evaluation of the artificial precipitation stimulation experiment in Fujian Province 1974[J]. J Nanjing Univ(Natural Science), 1:137-151(in Chinese).
- 高树俊, 2003. 一种人工增雨效果评估简便设计方法[J]. 山东气象, 23(94):39-40. Gao S J, 2003. A convenient method for evaluating artificial precipitation enhancement[J]. J Shandong Meteor, 23(94):39-40(in Chinese).
- 耿素江,班显秀,袁健,等, 2003. 基于历史相似天气评估人工增雨效果[J]. 气象科技, 31(4):231-236. Geng S J, Ban X X, Yuan J, et al, 2003. Assessment of rain enhancement effectiveness based on historically analogical weather pattern analysis[J]. Meteor Sci Technol, 31(4):231-236(in Chinese).
- 郭红艳,李春光,刘强,等, 2014. 山东济宁地区人工增雨效果检验[J]. 干旱气象, 32(3):454-459. Guo H Y, Li C G, Liu Q, et al, 2014. Effect testing of artificial precipitation operation in Jinjing of Shandong Province[J]. J Arid Meteor, 32(3):454-459(in Chinese).
- 郭青,曾惠娟,刘导,等, 2018. 平远一次人工增雨作业的效果评估[J]. 广东水利水电, (12):80-84. Guo Q, Zeng H J, Liu D, et al, 2018. Evaluation of an artificial precipitation enhancement operation in Pingyuan[J]. Guangdong Water Reso Hydropower, (12):80-84(in Chinese).
- 何晖,金华,李宏宇,等, 2012. 2008 年奥运会开幕式日人工消减雨作业中尺度数值模拟的初步结果[J]. 气候与环境研究, 17(1):46-58. He H, Jin H, Li H Y, et al, 2012. Preliminary study of the mesoscale numerical simulation of the rain mitigation operation during the opening ceremony of the 2008 Beijing Olympic Games [J]. Clim Environ Res, 17(1):46-58(in Chinese).
- 胡德奎,苏芬,祁小娟, 2019. 2018 年西宁市春季抗旱人工增雨效果分析[J]. 青海农林科技, (2):37-41. Hu D K, Su F, Qi X J, 2019. Analysis on the effect of drought resistance and artificial rain enhancement in spring of Xining City in 2018[J]. Sci Techn Qinghai Agri Forestry, (2):37-41(in Chinese).
- 黄庚,朱立亚,俞香仁,等, 1996. 商丘地区高炮增雨效果分析[J]. 气象, 22(6):32-35. Huang G, Zhu L Y, Yu X R, et al, 1996. Effect of precipitation enhancement operation in Minquan County[J]. Meteor Mon, 22(6):32-35(in Chinese).
- 黄美元, 2011. 我国人工降水亟待解决的问题和发展思路[J]. 气候与环境研究, 16(5):543-550. Huang M Y, 2011. Urgent problems and thinking of development for precipitation enhancement in China[J]. Clim Environ Res, 16(5):543-550(in Chinese).
- 黄彦彬,李天富,李春鸾,等, 2006. 2004 年春季海南火箭人工增雨效果检验[J]. 广东气象, (1):50-53. Huang Y B, Li T F, Li C L, et al, 2006. Evaluation on rocket-based artificial precipitation enhancement in Hainan in spring and summer of 2004[J]. Guangdong Meteor, (1):50-53(in Chinese).
- 黄彦彬,毛志远,邢峰华,等, 2019. 海南岛西部山区人工催化暖底积云随机化效果检验[J]. 气象科技, 47(3):486-494. Huang Y B, Mao Z Y, Xing F H, et al, 2019. Randomized effectiveness evaluation of artificially catalyzing heating-bottom cumulus in mountainous western Hainan Island[J]. Meteor Sci Technol, 47(3):486-494(in Chinese).

- 贾玲,陈争旗,余兴,2003. 2002 年陕西秋季人工增雨效果统计分析[J]. 陕西气象,(6):13-16. Jia L, Chen Z Q, Yu X, 2003. Statistical analysis of artificial precipitation enhancement effect in autumn 2002 in Shaanxi[J]. J Shaanxi Meteor,(6):13-16(in Chinese).
- 贾烁,2016. 江淮对流云人工增雨作业效果检验技术方法和个例分析[D]. 北京:中国气象科学研究院. Jia S, 2016. Technical methods study and cases analysis on the testing of convective clouds seeding effects in Yangtze-Huaihe Region[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences(in Chinese).
- 贾烁,姚展予,2016. 江淮对流云人工增雨作业效果检验个例分析[J]. 气象,42(2):238-245. Jia S, Yao Z Y, 2016. Case study on the convective clouds seeding effects in Yangtze Huaihe Region[J]. Meteor Mon,42(2):238-245(in Chinese).
- 蒋年冲,吴林林,曾光平,2006. 抗旱型火箭人工增雨效果检验方法初步研究[J],气象,32(8):54-58. Jiang N C, Wu L L, Zeng G P, 2006. On effect test of drought-resistant rocketry artificial precipitation enhancement operation[J]. Meteor Mon,32(8):54-58(in Chinese).
- 金德镇,雷恒池,郑娇恒,等,2007. 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,31(1):99-108. Jin D Z, Lei H C, Zheng J H, et al, 2007. Observation research on cloud microphysics and precipitation affection of stratiform cloud seeding by liquid carbon dioxide[J]. Chin J Atmos Sci,31(1):99-108(in Chinese).
- 康晓燕,韩辉邦,陈奇,等,2019. 2018 年玉树隆宝滩湿地恢复型人工增雨作业效果分析[J]. 青海环境,29(4):156-160,168. Kang X Y, Han H B, Chen Q, et al, 2019. Analysis of the effect of artificial rainfall for wetland restoration in Yushu Longbao Beach in 2018[J]. J Qinghai Environ,29(4):156-160,168(in Chinese).
- 康晓燕,周万福,马学谦,等,2017. 2016 年玛柯河林区森林防火人工增雨(雪)效果评估[J]. 青海农林科技,(3):58-62. Kang X Y, Zhou W F, Ma X Q, et al, 2017. Effect evaluation of precipitation enhancement for forest fire prevention in Makehe Forest Region in 2016[J]. Sci Tech Qinghai Agri Forestry,(3):58-62(in Chinese).
- 李斌,郑博华,兰文杰,等,2018. 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,41(4):686-692. Li B, Zheng B H, Lan W J, et al, 2018. Statistical analysis of effect of aircraft artificial snowfall enhancement in winter at Karamay[J]. Arid Land Geogr,41(4):686-692(in Chinese).
- 李大山,2002. 人工影响天气现状与展望[M]. 北京:气象出版社. Li D S, 2002. Actuality and Prospect of Weather Modification[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 李冬楠,牛忠清,李鹏,2019. 大兴安岭地区一次飞机增雨作业效果检验[J]. 黑龙江气象,36(2):37-38. Li D N, Niu Z Q, Li P, 2019. Effect evaluation of an airborne precipitation enhancement in Great Khingan Mountains Area[J]. Heilongjiang Meteor,36(2):37-38(in Chinese).
- 李红斌,傅瑜,王秀萍,等,2016. 一次层状云火箭增雨作业效果分析[J]. 气象,42(11):1402-1409. Li H B, Fu Y, Wang X P, et al, 2016. Effect verification and analysis for artificial precipitation enhancement of stratiform cloud by rocket in Dalian[J]. Meteor Mon,42(11):1402-1409(in Chinese).
- 李宏宇,嵇磊,周崑,等,2014. 北京地区人工增雨效果和防雹经济效益评估[J]. 高原气象,33(4):1119-1130. Li H Y, Ji L, Zhou W, et al, 2014. Effect evaluation of precipitation enhancement and hail suppression programs in Beijing Region[J]. Plateau Meteor,33(4):1119-1130(in Chinese).
- 李宏宇,王华,2006. 北京地区人工增雨作业效果统计分析[C]//中国气象学会 2006 年年会“人工影响天气作业技术专题研讨会”分会场论文集. 成都:中国气象学会. Li H Y, Wang H, 2006. Statistical analysis on the effect of artificial precipitation enhancement in Beijing [C] // Conference Proceedings of 2006 National Conference of Symposium on Weather Modification Technology. Chengdu: Chinese Meteorological Society(in Chinese).
- 李健丽,余晔,赵素平,2018. 新疆阿勒泰地区人工增水效果评估[J]. 冰川冻土,40(2):388-394. Li J L, Yu Y, Zhao S P, 2018. Effect evaluation of artificial precipitation in Altay Prefecture, Xinjiang[J]. J Glaciol Geocryol,40(2):388-394(in Chinese).
- 李琼,汪玲,丁莉,等,2017. 湖南省一次飞机人工增雨作业的方案设计及效果评估[J]. 安徽农业科学,45(20):157-160. Li Q, Wang L, Ding L, et al, 2017. Scheme design and effect evaluation of a aircraft artificial precipitation operation in Hunan Province[J]. J Anhui Agri Sci,45(20):157-160(in Chinese).
- 李书严,李伟,赵习方,2006. 北京市人工增雨效果评估方法分析[J]. 气象科技,34(3):296-300. Li S Y, Li W, Zhao X F, 2006. Different methods to assess precipitation stimulation in Beijing Region[J]. Meteor Sci Tech,34(3):296-300(in Chinese).
- 李玮,汪丽,许弋,等,2007. 2005 年 9 月贵州飞机人工增雨及效果评估[J]. 贵州气象,(3):40-42. Li W, Wang L, Xu Y, et al, 2007. Evaluation on aircraft cloud seeding operation in Guizhou in September 2005[J]. J Guizhou Meteor,(3):40-42(in Chinese).
- 廖向花,张逸轩,陈小敏,等,2014. 重庆一次典型飞机人工增雨作业的效果分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),39(9):156-163. Liao X H, Zhang Y X, Chen X M, et al, 2014. On effect evaluation of an aircraft cloud seeding operation in Chongqing[J]. J Southwest China Normal Univ (Natural Science Edition),39(9):156-163(in Chinese).
- 林丹,王维佳,2020. 四川盆地初夏一次飞机增雨作业的效果检验[J]. 成都信息工程大学学报,35(1):117-122. Lin D, Wang W J, 2020. On effect assessment of an airborne cloud seeding operation in early summer in Sichuan Basin[J]. J Chengdu Univ Inf Technol,35(1):117-122(in Chinese).
- 刘晴,2013. 人工增雨效果统计检验方案优选及个例分析[D]. 北京:中国气象科学研究院. Liu Q, 2013. The statistical method optimization and case study of effectiveness test in precipitation

- enhancement[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences(in Chinese).
- 刘晴,姚展予,2013. 飞机增雨作业物理检验方法探究及个例分析[J]. 气象,39(10):1359-1368. Liu Q, Yao Z Y, 2013. On physical evaluation of aircraft cloud seeding and case study[J]. Meteor Mon,39(10):1359-1368(in Chinese).
- 刘卫国,陶玥,周毓荃,2021. 层状云催化宏微观物理响应的数值模拟研究[J]. 大气科学,45(1):37-57. Liu W G, Tao Y, Zhou Y Q, 2021. Numerical simulation of the macro and micro physical responses of stratiform cloud seeding[J]. Chin J Atmos Sci, 45(1):37-57(in Chinese).
- 刘云辉,郑玉梅,刘云升,等,2008. 火箭增雨作业效果评估分析[J]. 气象科技,36(3):327-330. Liu Y H, Zheng Y M, Liu Y S, et al, 2008. Assessment and analysis of rocket rain enhancement effectiveness[J]. Meteor Sci Technol,36(3):327-330(in Chinese).
- 陆耀辉,章莹菁,2008. 桐庐县两次人工增雨作业对比分析[C]//第十五届全国云降水与人工影响天气科学会议论文集(II). 长春:中国气象学会. Lu Y H, Zhang Y J, 2008. Comparative analysis of two artificial precipitation enhancement operations in Tonglu County [C]//15th National Conference on Cloud and Precipitation Physics and Weather Modification(II). Changchun:Chinese Meteorological Society(in Chinese).
- 宁瑞斌,2012. 一次人工影响天气作业的增雨效果分析[J]. 河北农业科学,16(5):94-95. Ning R B, 2012. Analysis of precipitation enhancement effect of a weather modification operation[J]. J Hebei Agri Sci,16(5):94-95(in Chinese).
- 宁瑞斌,纪凡华,于金源,等,2016. 2014年9月14日聊城人工增雨效果分析[J]. 山东气象,36(145):18-22. Ning R B, Ji F H, Yu J Y, et al, 2016. Analysis on the effect of artificial precipitation enhancement in Liaocheng on September 14, 2014[J]. J Shandong Meteor,36(145):18-22(in Chinese).
- 钱莉,王文,张峰,等,2006. 河西走廊东部冬春季人工增雪试验效果评估[J]. 干旱区研究,23(2):349-354. Qian L, Wang W, Zhang F, et al, 2006. Assessment on the artificial snowfall experiment in the East Hexi Corridor in winter and spring[J]. Arid Zone Res,23(2):349-354(in Chinese).
- 秦长学,张嵩,李书严,等,2005. 密云水库蓄水型增水作业效果分析[J]. 气象科技,33(S):74-77. Qin C X, Zhang Q, Li S Y, et al, 2005. Effectiveness evaluation of rain enhancement over Miyun Reservoir[J]. Meteor Sci Technol,33(S):74-77(in Chinese).
- 秦彦硕,蔡森,刘世玺,等,2017. 华北秋季一次低槽冷锋积层混合云宏微观物理特征与催化响应分析[J]. 气象学报,75(5):835-849. Qin Y S, Cai M, Liu S X, et al, 2017. A study on macro and micro physical structures of convective-stratiform mixed clouds associated with a cold front in autumn and their catalytic responses in North China[J]. Acta Meteor Sin,75(5):835-849(in Chinese).
- 邵振平,杜春丽,2014. APESTS 效果评估系统在河南省春季人工影响天气作业中的应用[J]. 河南科学,32(8):1594-1598. Shao Z P, Du C L, 2014. Application of the artificial precipitation enhancement statistical test system in weather modification of Henan[J]. Henan Sci,32(8):1594-1598(in Chinese).
- 申亿铭,陈吉航,1986. 飞机播撒催化剂扩散问题的数值解法[J]. 气象学报,44(4):440-446. Shen Y M, Chen J H, 1986. Numerical solution to the diffusive problem of the catalytic agent released by the airplane[J]. Acta Meteor Sin, 44(4):440-446(in Chinese).
- 孙海燕,肖辉,王振会,等,2005. 对流性云火箭增雨试验效果的数值模式评估[J]. 南京气象学院学报,28(2):172-179. Sun H Y, Xiao H, Wang Z H, et al, 2005. Modeling evaluations on effects for convective cloud seeding with AgI-loading rocket to enhance precipitation[J]. J Nanjing Inst Meteor, 28(2):172-179(in Chinese).
- 孙立德,关心,李宝刚,等,2019. 气球携带碘化银焰弹增雨雪效果分析[J]. 气象与环境学报,35(5):93-99. Sun L D, Guan X, Li B G, et al, 2019. The effectiveness analysis of the artificial precipitation enhancement technique with the silver iodide (AgI) flame bomb carried by a balloon[J]. J Meteor Environ, 35(5):93-99(in Chinese).
- 唐林,蔡荣辉,王治平,等,2008. 湖南省夏季大型水库人工增雨效果效益评估方法[J]. 长江流域资源与环境,17(S1):20-24. Tang L, Cai R H, Wang Z P, et al, 2008. On the large reservoirs precipitation enhancement evaluation method in Hunan[J]. Res Environ Yangtze Basin,17(S1):20-24(in Chinese).
- 汪玲,刘黎平,汪天颖,等,2015. 基于区域跟踪的增雨效果分析方法新探[J]. 暴雨灾害,34(1):9-16. Wang L, Liu L P, Wang T Y, et al, 2015. The analysis of new assessment method based on region tracking for artificial precipitation enhancement[J]. Torr Rain Dis,34(1):9-16(in Chinese).
- 汪学林,刘健,1992. 吉林省 1980—1987 年播云降雨的效果检验及其判据[J]. 应用气象学报,3(4):418-423. Wang X L, Liu J, 1992. The effect test and criterion of clouds seeding during 1980—1987 in Jilin Province[J]. J Appl Meteor Sci,3(4):418-423(in Chinese).
- 王化玲,张新华,杨士恩,等,2010. 一次聊城地面人工增雨作业效果分析[J]. 山东气象,30(124):16-17. Wang H L, Zhang X H, Yang S E, et al, 2010. Analysis of a ground-based artificial precipitation enhancement effect[J]. J Shandong Meteor,30(124):16-17(in Chinese).
- 王吉宏,周德平,房彬,等,2009. 一次东北冷涡天气过程的人工增雨作业效果检验[J]. 安徽农业科学,37(29):14264-14265. Wang J H, Zhou D P, Fang B, et al, 2009. Test on artificial precipitation effect in a cold vortex weather process in Northeast China[J]. J Anhui Agri Sci,37(29):14264-14265(in Chinese).
- 王佳,陈钰文,2015. 2010 年盛夏人工增雨防控太湖蓝藻效果分析[J]. 中国农学通报,31(14):232-237. Wang J, Chen Y W, 2015. Effect analysis of artificial rain enhancement on prevention and control of Taihu Lake cyanophyta in 2010 summer[J]. Chin

- Agri Sci Bull,31(14):232-237(in Chinese).
- 王婉,2008.非随机化人工增雨试验统计检验基本问题研究和方案改进[D].北京:中国气象科学研究院. Wang W,2008. Numerical analysis of statistical power in precipitation enhancement of non-randomized experiment and statistical method improvement[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese).
- 王婉,石玉恒,李宏宇,等,2014.对流云人工增雨效果检验技术方法及应用[J].气象科技,42(6):1131-1136. Wang W, Shi Y H, Li H Y, et al, 2014. A method for evaluating effectiveness of convective cloud precipitation enhancement and its application [J]. Meteor Sci Technol, 42(6):1131-1136(in Chinese).
- 王婉,姚展予,2009.2006年北京市人工增雨作业效果统计分析[J].高原气象,28(1):195-202. Wang W, Yao Z Y, 2009. Statistical estimation of artificial precipitation enhancement effectiveness in Beijing in 2006 [J]. Plateau Meteor, 28(1):195-202 (in Chinese).
- 王婉,姚展予,2012.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,17(6):855-861. Wang W, Yao Z Y, 2012. Numerical analysis of statistical power in precipitation enhancement experiment in Beijing and estimation of operational cloud seeding effectiveness[J]. Clim Environ Res, 17(6):855-861(in Chinese).
- 王伟健,2017.江西省2008—2014年冬季飞机增雨作业对季节降水量的影响及其范围的研究[D].北京:中国气象科学研究院. Wang W J, 2017. Study on the influence range of wintertime operational cloud-seeding in Jiangxi Province during 2008—2014 [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese).
- 王伟健,姚展予,贾烁,等,2018.随机森林算法在人工增雨效果统计检验中的应用研究[J].气象与环境科学,41(2):111-117. Wang W J, Yao Z Y, Jia S, et al, 2018. Application research on random forest algorithm in the statistical test of rainfall enhancement effect[J]. Meteor Environ Sci, 41(2):111-117(in Chinese).
- 王晓立,马劲松,王恬茹,等,2018.2016-04-16潍坊市人工增雨效果检验分析[J].气象水文海洋仪器,35(1):27-33. Wang X L, Ma J S, Wang T R, et al, 2018. Analysis on the effect of artificial precipitation enhancement in Weifang on April 16, 2016 [J]. Meteor, Hydrol Marine Instru, 35(1):27-33(in Chinese).
- 王以琳,雷恒池,2003.冷云飞机人工引晶检验[J].大气科学,27(5):929-938. Wang Y L, Lei H C, 2003. Test of cold cloud seeding [J]. Chin J Atmos Sci, 27(5):929-938(in Chinese).
- 王以琳,李德生,刘诗军,2012.飞机人工增雨分层历史回归效果检验方法探讨[J].气候与环境研究,17(6):862-870. Wang Y L, Li D S, Liu S J, 2012. Stratified sampling historical regression method for aircraft precipitation enhancement effect test[J]. Clim Environ Res, 17(6):862-870(in Chinese).
- 王以琳,薛晓萍,刘文,2000.飞机人工增雨的农业效益评估[J].气象,26(3):17-21. Wang Y L, Xue X P, Liu W, 2000. The effect assessment of cloud seeding for agriculture[J]. Meteor Mon, 26(3):17-21(in Chinese).
- 望胜玲,许焱,2013.一次地面火箭人工增雨作业效果分析[J].安徽农业科学,41(31):12392-12394. Wang S L, Xu Y, 2013. Effectiveness analysis of a ground rocket rain enhancement operation [J]. J Anhui Agri Sci, 41(31):12392-12394(in Chinese).
- 韦增岸,张正国,程鹏,等,2019.广西一次飞机增雨过程个例分析[J].气象研究与应用,40(3):90-93,116. Wei Z A, Zhang Z G, Cheng P, et al, 2019. Analysis of an aircraft precipitation enhancement in Guangxi[J]. J Meteor Res Appl, 40(3):90-93,116 (in Chinese).
- 王道平,2018.昆明市云龙水库常态化人工增雨降水效果分析[J].时代农机,45(7):61,63. Wen D P, 2018. Analysis of effect on the regular artificial precipitation enhancement in Yunlon Reservoir, Kunming[J]. Times Agri Machinery, 45(7):61,63(in Chinese).
- 吴万友,李德俊,宾振,等,2008.江西对流云地面非随机作业效果评估统计方法研究[C]//第十五届全国云降水与人工影响天气科学会议论文集(II).长春:中国气象学会. Wu W Y, Li D J, Bin Z, et al, 2008. [C]// Statistical approach for evaluation of random ground-based cloud seeding effect of convective cloud in Jiangxi province [C]// 15th National Conference on Cloud and Precipitation Physics and Weather Modification (II). Changchun: Chinese Meteorological Society (in Chinese).
- 吴香华,2014.人工增雨效果的统计检验研究——基于现代统计方法[D].南京:南京信息工程大学. Wu X H, 2014. Study on statistical test of artificial precipitation enhancement effects-based on modern statistical methods [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese).
- 吴香华,牛生杰,金德镇,等,2015.自然降水变异对人工增雨效果评估的影响[J].中国科学:地球科学,45(7):1011-1019. Wu X H, Niu S J, Jin D Z, et al, 2015. Influence of natural rainfall variability on the evaluation of artificial precipitation enhancement [J]. Sci China Earth Sci, 45(7):1011-1019(in Chinese).
- 夏彭年,1998.内蒙古地区层状云催化的条件和效果——介绍“移动目标区”人工增雨效果评估方法[M]//人工影响天气(十一).北京:气象出版社:33-40. Xia P N, 1998. Conditions and effects of stratus cloud in Inner Mongolia—an introduction to the evaluation method “moving target region” of artificial precipitation enhancement [M]// Weather Modification (Eleven). Beijing: China Meteorological Press:33-40(in Chinese).
- 谢继民,贾朝阳,孙鸿娉,等,2002.盐湖区小流域人工增雨方案及效果检验[J].山西气象,2(59):19-20. Xie J M, Jia Z Y, Sun H P, et al, 2002. The plan and the effect of artificial precipitation in Yanhu district small basin [J]. Shanxi Meteor Quart, 2(59):19-20(in Chinese).
- 辛乐,姚展予,2011.一次积层混合云飞机播云对云微物理过程影响效应的分析[J].气象,37(2):194-202. Xin L, Yao Z Y, 2011. Studies on the microphysical characteristics of an aircraft seeding in

- convective line with trailing stratiform cloud[J]. Meteor Mon, 37(2):194-202(in Chinese).
- 徐朝晖, 2019. 鹤壁市一次人工增雨效果检验及评估[J]. 河南科技, (13):154-156. Xu Z H, 2019. Inspection and evaluation of artificial precipitation effect in Hebi City[J]. Henan Sci Tech, (13): 154-156(in Chinese).
- 颜文胜, 林继生, 汪瑛, 等, 2006. 广东省人工增雨作业效果的数值统计评估方法研究[C]//中国气象学会 2006 年年会“人工影响天气作业技术专题研讨会”分会场论文集. 成都: 中国气象学会 Yan W S, Lin J S, Wang Y, et al, 2006. Study on numerical statistical evaluation method of artificial precipitation enhancement in Guangdong Province[C]// Conference Proceedings of 2006 Natiroal Conference of Symposium on Weather Modification Technology. Chengdu: Chinese Meteorological Society (in Chinese).
- 杨永龙, 薛生梁, 钱莉, 等, 2006. 河西走廊东部人工降水试验效果评估[J]. 干旱地区农业研究, 24(5):218-224. Yang Y L, Xue S L, Qian L, et al, 2006. Assessment of precipitation stimulation experiment in eastern Hexi Corridor[J]. Agric Res Arid Areas, 24(5):218-224(in Chinese).
- 姚展予, 2016. 人工增雨作业效果检验技术指南[Z]. 北京. Yao Z Y, 2016. Technical guide of precipitation enhancement evaluation [Z]. Beijing(in Chinese).
- 叶家东, 1979. 人工降水的试验设计和效果检验[J]. 气象, 5(2):26-29. Ye J D, 1979. Design and evaluation of artificial precipitation enhancement experiment[J]. Meteor Mon, 5(2):26-29(in Chinese).
- 叶家东, 程克明, 1979. 古田水库地区人工降水试验效果统计分析[J]. 大气科学, 3(2):131-140. Ye J D, Cheng K M, 1979. Statistical evaluation of the artificial rainfall stimulation experiment in Gutian Veservoir Region, Fujian Province[J]. Chin J Atmos Sci, 3(2):131-140(in Chinese).
- 叶家东, 程克明, 曾光平, 1981. 闽中雨季区域雨量统计特性及人工影响的效果[J]. 气象学报, 39(4):474-482. Ye J D, Cheng K M, Zeng G P, 1981. The statistical characteristics of areal rainfall and the effects of randomized cloud seeding experiment in Gutian Fujian[J]. Acta Meteor Sin, 39(4):474-482(in Chinese).
- 叶家东, 范蓓芬, 1982. 人工影响天气的统计数学方法[M]. 北京: 科学出版社. Ye J D, Fan B F, 1982. Statistical and Mathematical Method of Weather Modification[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 叶家东, 范蓓芬, 杜京朝, 1998. 人工增雨试验中的反效果问题[J]. 应用气象学报, 9(3):81-89. Ye J D, Fan B F, Du J Z, 1998. Study of negative effects in artificial precipitation enhancement experiments[J]. Quart J Appl Meteor, 9(3):81-89(in Chinese).
- 叶家东, 李铁林, 2001. 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, 21(1):64-72. Ye J D, Li T L, 2001. Evaluation methods of cloud seeding effect with regional control and convariable regression analysis [J]. Sci Meteor Sin, 21(1):64-72 (in Chinese).
- 叶家东, 罗幸贫, 曾光平, 等, 1984. 随机试验功效的数值分析[J]. 气象学报, 42(1):69-79. Ye J D, Luo X P, Zeng G P, et al, 1984. Numerical analysis of statistical power in randomized precipitation enhancement experiment[J]. Acta Meteor Sin, 42(1):69-79 (in Chinese).
- 游景炎, 段英, 游来光, 1994. 云降水物理和人工增雨技术研究[M]. 北京: 气象出版社, 284-288. You J Y, Duan Y, You L G, 1994. Study on Cloud and Precipitation Microphysics, and Weather Modification Techonology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 284-288(in Chinese).
- 于丽娟, 2009. 人工增雨效果物理检验适用方法研究和个例分析[D]. 北京: 中国气象科学研究院. Yu L J, 2009. The research of physical approaches for effectiveness evaluation of artificial precipitation enhancement and case studies [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteororological Sciences(in Chinese).
- 曾光平, 1999. 非随机化人工增雨试验效果的统计模拟研究[J]. 应用气象学报, 10(2):3-5. Zeng G P, 1999. Statistical simulation study on the effect of non-randomized artifical precipitation enhancement experiment[J]. J Appl Meteor Sci, 10(2):3-5 (in Chinese).
- 曾光平, 方仕珍, 1986. 福建省古田水库人工降雨试验效果的多元回归分析[J]. 热带气象, 2(4):336-342. Zeng G P, Fang S Z, 1986. The result multivariate analysis of artificial rainfall in Fujian Gutian Area during 1975-1984[J]. J Trop Meteor, 2(4):336-342(in Chinese).
- 曾光平, 方仕珍, 肖锋, 1991. 1975-1986 年古田水库人工降雨效果总分析[J]. 大气科学, 15(4):97-108. Zeng G P, Fang S Z, Xiao F, 1991. The total analysis of the effect of artificial rainfall in Gutian Reservoir Area, Fujian (1975-1986)[J]. Chi J Atmos Sci, 15(4):97-108(in Chinese).
- 曾光平, 吴明林, 林长城, 等, 1993. 古田水库人工降雨效果的综合评价[J]. 应用气象学报, 4(2):154-161. Zeng G P, Wu M L, Lin C C, et al, 1993. A comprehensive evaluation of the effect of artificial precipitation in Gutian Reservoir Area[J]. Quart J Appl Meteor, 4(2):154-161(in Chinese).
- 曾光平, 郑淑真, 胡敬雍, 等, 1989. 福建省古田水库地区人工降雨试验雨水中 Ag^+ 分布的研究[J]. 热带气象, 5(1):63-71. Zeng G P, Zheng S Z, Hu J Y, et al, 1989. A study of the distribution of the Ag^+ content in rain-water during artifical rainfall experiment Gutian Area of Fujian Province[J]. J Trop Meteor, 5(1):63-71(in Chinese).
- 曾光平, 朱鼎华, 王祖炉, 1997. 古田人工降雨应用研究[J]. 气象, 23(12):35-39. Zeng G P, Zhu D H, Wang Z L, 1997. An application study on the artificial rainfall over Gutian Reservoir Region [J]. Meteor Mon, 23(12):35-39(in Chinese).
- 查思佳, 张慧娇, 李道潇, 等, 2020. 2014 年南京青奥会开幕式日降水过程数值模拟研究[J]. 大气科学, 44(6):1258-1274. Zha S J, Zhang H J, Li X X, et al, 2020. Numerical simulation of precipitation

- processes during the opening ceremony of the Nanjing 2014 Youth Olympic Games[J]. *Chin J Atmos Sci*, 44(6): 1258-1274 (in Chinese).
- 翟晴飞, 敖雪, 袁健, 等, 2017. 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*, 33(6): 96-104.
- Zhai Q F, Ao X, Yuan J, et al, 2017. Effective test of an artificial precipitation enhancement operation process in Liaoning Province based on a regional historical regressive statistical method [J]. *J Meteor Environ*, 33(6): 96-104 (in Chinese).
- 翟羽, 肖辉, 杜秉玉, 等, 2008. 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*, 31(2): 228-233.
- Zhai Y, Xiao H, Du B Y, et al, 2008. Application of the cluster statistical test to effectiveness evaluation of artificial precipitation enhancement [J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 31(2): 228-233 (in Chinese).
- 张令振, 祁小娟, 2018. 2017 年春季西宁地区人工增雨效果评估[J]. *青海气象*, (3): 74-78.
- Zhang L Z, Qi X J, 2018. Evaluation on artificial precipitation enhancement in Xining region in spring 2017[J]. *J Qinghai Meteor*, (3): 74-78 (in Chinese).
- 张良, 王式功, 尚可政, 等, 2006. 中国人工增雨研究进展[J]. *干旱气象*, 24(4): 73-81.
- Zhang L, Wang S G, Shang K Z, et al, 2006. Review of researches on rainfall enhancement in China[J]. *Arid Meteor*, 24(4): 73-81 (in Chinese).
- 张阳, 2006. 龙羊峡水库库区人工增雨、增水效果评估[D]. 南京: 河海大学.
- Zhang Y, 2006. Evaluating effects of artificial precipitation and runoff by man of Longyangxia Reservoir[D]. Nanjing: Hohai University (in Chinese).
- 张阳, 包为民, 王浩, 等, 2006. 基于地形影响的龙羊峡库区人工增雨效果评估[J]. *西北水力发电*, (1): 24-27.
- Zhang Y, Bao W M, Wang H, et al, 2006. Evaluation and verification of effect of artificial rain induced runoff increase on Longyangxia Reservoir [J]. *J Northwest Hydroelectric Power*, (1): 24-27 (in Chinese).
- 张玉峰, 贾成刚, 张文喜, 2004. 安阳人工增雨十年效果评估[J]. *河南气象*, (4): 4.
- Zhang Y F, Jia C G, Zhang W X, 2004. Effect of artificial precipitation enhancement in Anyang based on ten years evaluation [J]. *J Shandong Meteor*, (4): 4 (in Chinese).
- 张中波, 2010. 湖南省人工增雨统计检验系统设计与实现[J]. *安徽农业科学*, 38(31): 17623-17624.
- Zhang Z B, 2010. Design and area-ization of statistical examination system for Hunan artificial precipitation enhancement [J]. *J Anhui Agri Sci*, 38(31): 17623-17624 (in Chinese).
- 张中波, 唐林, 2010. 水库蓄水型人工增雨效果评估及其应用[J]. *安徽农学通报*, 16(2): 115, 151.
- Zhang Z B, Tang L, 2010. Evaluation and application of artificial precipitation enhancement of reservoir impoundment [J]. *Anhui Agri Sci Bull*, 16(2): 115, 151 (in Chinese).
- 张自国, 夏彭年, 苗百岭, 2008. 内蒙古自治区人工增雨效果检验方法及效果分析[C]//第十五届全国云降水与人工影响天气科学会议论文集(II). 长春: 中国气象学会.
- Zhang Z G, Xia P N, Miao B L, 2008. Evaluation approach of artificial precipitation enhancement in Inner Mongolia [C]// 15th National Conference on Cloud and Precipitation Physics and Weather Modification (II). Chang-chun: Chinese Meteorological Society (in Chinese).
- 赵瑞金, 杨保东, 李江波, 2005. 多普勒雷达产品在人工增雨效果检验中的应用[J]. *气象科技*, 33(S1): 57-60, 65.
- Zhao R J, Yang B D, Li J B, 2005. Application of Doppler weather radar to effectiveness evaluation of precipitation enhancement [J]. *Meteor Sci Technol*, 33(S1): 57-60, 65 (in Chinese).
- 郑博华, 李圆圆, 赵克明, 等, 2019. 利用统计检验对比法对克拉玛依市冬季飞机人工增水作业效果再分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 13(5): 132-138.
- Zheng B H, Li Y Y, Zhao K M, et al, 2019. Analysis of the effect of aircraft artificial water-increasing operation in winter in Karamay City by statistical test comparison method [J]. *Desert Oasis Meteor*, 13(5): 132-138 (in Chinese).
- 周德平, 宫福久, 高建春, 等, 2004. 一次飞机播云的微物理效应分析[J]. *气象科学*, 24(4): 405-412.
- Zhou D P, Gong F J, Gao J C, et al, 2004. The studies on the microphysical characteristics of an aircraft cloud seeding [J]. *Sci Meteor Sin*, 24(4): 405-412 (in Chinese).
- 周德平, 宫福久, 王吉宏, 2006. 东北冷涡云系人工增雨作业效果的检验和分析[J]. *高原气象*, 25(5): 950-958.
- Zhou D P, Gong F J, Wang J H, 2006. Analyses and tests on artificial precipitation effect of cloud system in cold vortex in Northeast China [J]. *Plateau Meteor*, 25(5): 950-958 (in Chinese).
- 周毓荃, 朱冰, 2014. 高炮、火箭和飞机催化扩散规律和作业设计的研究[J]. *气象*, 40(8): 965-980.
- Zhou Y Q, Zhu B, 2014. Study on diffusion regularity and operation design of anti-aircraft-gun, rocket and plane cloud seeding [J]. *Meteor Mon*, 40(8): 965-980 (in Chinese).
- 祝晓芸, 2016. 江西省对流云火箭增雨作业效果检验技术方法研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院.
- Zhu X Y, 2016. Technical methods study of convective clouds seeding effects in Jiangxi Province by rockets [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese).
- 祝晓芸, 姚展予, 2017. 江西省对流云火箭增雨作业个例分析[J]. *气象*, 43(2): 221-231.
- Zhu X Y, Yao Z Y, 2017. Analysis of convective cloud seeding cases by rockets in Jiangxi Province [J]. *Meteor Mon*, 43(2): 221-231 (in Chinese).
- Breed D, Rasmussen R, Weeks C, et al, 2014. Evaluating winter orographic cloud seeding, design of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP) [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 53(2): 282-299.
- Dong X B, Zhao C F, Yang Y, et al, 2020. Distinct change of supercooled liquid cloud properties by aerosols from an aircraft-based seeding experiment [J]. *Earth Space Sci*, 7(8): e2020EA001196.
- Gabriel K R, 1967. The Israeli artificial rainfall stimulation experiment. Statistical evaluation for the period 1961-1965 [C]// Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 5: Weather Modification. Berkeley:

- 91-113.
- Gabriel K R, Avichai Y, Steinberg R, 1967. A statistical investigation of persistence in the Israeli artificial rainfall stimulation experiment[J]. *J Appl Meteor*, 6(2): 323-325.
- Geerts B, Pokharel B, Friedrich K, et al, 2013. The AgI seeding cloud impact investigation (ASCIID) Campaign 2012: overview and preliminary results[J]. *J Weather Modif*, 45: 24-43.
- Kemphorne O, Doerfler T, 1969. The behaviour of some significance tests under experimental randomization[J]. *Biometrika*, 56(2): 231-248.
- Krauss T W, Santos J R, 2004. Exploratory analysis of the effect of hail suppression operations on precipitation in Alberta[J]. *Atmos Res*, 71(1/2/3): 35-50.
- Mather G K, Terblanche D E, Steffens F E, et al, 1997. Results of the South African cloud-seeding experiments using hygroscopic flares[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 36(11): 1433-1447.
- Mielke P W Jr, 1995. Comments on the climax I and II experiments including replies to rangno and hobbs[J]. *J Appl Meteor*, 34(5): 1228-1232.
- Pokharel B, Geerts B, Jing X Q, 2014a. The impact of ground-based glaciogenic seeding on orographic clouds and precipitation: a multisensor case study[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 53(4): 890-909.
- Pokharel B, Geerts B, Jing X, et al, 2014b. The impact of ground-based glaciogenic seeding on clouds and precipitation over mountains: a multi-sensor case study of shallow precipitating orographic cumuli[J]. *Atmos Res*, 147-148: 162-182.
- Rosenfeld D, Yu X, Dai J, 2005. Satellite-retrieved microstructure of AgI seeding tracks in supercooled layer clouds[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 44(6): 760-767.
- Schickedanz P T, Huff F A, 1971. The design and evaluation of rainfall modification experiments[J]. *J Appl Meteor*, 10(3): 502-514.
- Sharon D, 1978. Rainfall fields in Israel and Jordan and the effect of cloud seeding on them[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 17(1): 40-48.
- Smith E J, Adderley E E, Walsh D T, 1963. A cloud-seeding experiment in the Snowy Mountains, Australia[J]. *J Appl Meteor*, 2(3): 324-332.
- Wang F, Li Z Q, Jiang Q, et al, 2019a. Evaluation of hygroscopic cloud seeding in liquid-water clouds: a feasibility study[J]. *Atmos Chem Phys*, 19(23): 14967-14977.
- Wang W J, Yao Z Y, Guo J P, et al, 2019b. The extra-area effect in 71 cloud seeding operations during winters of 2008-14 over Jiangxi Province, East China[J]. *J Meteor Res*, 33(3): 528-539.
- Wang J, Yue Z G, Rosenfeld D, et al, 2021. The evolution of an AgI cloud-seeding track in central China as seen by a combination of radar, satellite, and disdrometer observations[J]. *J Geophys Res Atmos*, 126(11): e2020JD033914.
- Wu X H, Niu S J, Jin D Z, et al, 2015. Influence of natural rainfall variability on the evaluation of artificial precipitation enhancement[J]. *Sci China Ear Sci*, 58(6): 906-914.

(本文责编:俞卫平)