

曾庆存, 雷恒池, 洪钟祥. 2012. 人工增雨研究和作业的进展以及提高科学化的可行途径——“人工增雨研究专辑”前言 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 659–665. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.01. Zeng Qingcun, Lei Hengchi, Hong Zhongxiang. 2012. Advances in the research and practice of artificial precipitation enhancement and some possible and practical ways for their further development—Preface to the Special Issue on the Artificial Precipitation Enhancement Research [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 659–665.

人工增雨研究和作业的进展以及提高科学化的可行途径——“人工增雨研究专辑”前言

曾庆存 雷恒池 洪钟祥

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 我国人工增雨研究有很好的成果, 有大规模作业的丰富经验, 近年来又有很大进步。“人工增雨研究专辑”选登其中一些具有普遍意义的成果和经验, 以及未来近期内可以再进一步提高的一些思考和建议。作者试图先对这些经验和问题进行归纳概述和分析讨论。大体上说, 这些成功的研究成果和作业经验有: 选择有利于增雨的历史天气—气候背景条件、临近作业时对作业云的判断、机理的数值模拟、凝结核和雨滴及它们的谱分布规律和新催化剂的研制等。未来近期内应该做、而且可以有结果的使作业进一步科学化的工作, 除结合经验介绍而指出的一些外, 关键是: 1) 尽量做到观测—预报—作业—效果检验一体化; 直接面对增雨作业效果本身进行检验, 这样才能使作业和效果检验科学化。为此应用控制论的观点和方法 (尤其是工程控制论和自然控制论) 是可行的。2) 要开展暖性对流云催化作业的研究。3) 一定要对已有的工作经验进行系统总结, 并一定要将研究工作和作业实践密切结合起来。4) 一定要气象和水利部门协调起来, 才能充分有效地解决四度空间的水资源利用问题。此外, 还涉及其他一些人工影响天气的问题, 如防雹、消雾等。

关键词 人工增雨 催化作业 效果检验 工程和自然控制论

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0659-07

中图分类号 P427

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.01

Advances in the Research and Practice of Artificial Precipitation Enhancement and Some Possible and Practical Ways for Their Further Development —Preface to the Special Issue on the Artificial Precipitation Enhancement Research

ZENG Qingcun, LEI Hengchi, and HONG Zhongxiang

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract China has produced many good research results and abundant experience in the practice of artificial precipitation enhancement. Published in this Special Issue are articles describing successful experience that has general applicability and other articles describing practical possibilities for more scientific and effective operation. Here we first review and discuss these successful experiences: The climatological statistics of weather systems and the regions that are favorable for artificial precipitation enhancement, pre-application methods of selecting cloud-seeding targets, analysis of the relevant mechanism and numerical simulations, the characteristics and spectral distributions of nuclei in both cloud and rain droplets, and new findings regarding novel materials and technologies for more effective cloud seeding. Second,

收稿日期 2012-08-21 收到, 2012-09-21 收到修定稿

项目资助 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-EW-203, 中国科学院大气物理研究所方向项目 IAP201209, 博士后科学基金 20100480436

作者简介 曾庆存, 男, 研究员, 从事大气科学和自然控制论研究。

we review practical possibilities for further development: The application of engineering and natural cybernetics, which make possible an entire engineering system consisting of observation, prediction, operation, and evaluation and provide direct evaluation of precipitation enhancement; greater attention to convective warm cloud seeding; more scientific, rigorous, and systematic analysis of practical experience and close meshing of research into the mechanism with practical applications; and planning for combining weather modification and hydraulic engineering to achieve more effective use of four-dimensional fresh water resources. In addition, we briefly review other aspects of weather modification, such as hail suppression and fog dissipation, and other topics in natural cybernetics.

Keywords Artificial precipitation enhancement, Cloud seeding, Evaluation of cloud seeding, Engineering and natural cybernetics

1 引言

人工影响天气工作始于 20 世纪 40 年代中期,至今虽只有 60 多年的时间,但由于人类生产和生活的迫切需要,人们便将这门还尚未发育成熟的科学大规模地应用起来,在许多国家,例如美国、俄罗斯、以色列和我国,而今都积累了大量的实践经验。尤其是在我国,人工增雨、防雹已经成为上至中央,下至各省,甚至各个县和乡村的气象业务部门或与之有关的单位的一项重要业务,各地政府所必问,防灾所必需,人民所关切,家喻户晓,实践的规模和经验的丰富都是世界上无与伦比的。

也应指出,由于这门科学尚太年轻,大规模的实践过程中也存在许多未解的问题。不论实践的成功与否,都还有未被认识的机理;作业带有相当主观成分,甚至有随意或盲目的成分;尤其是没有效果检验的定量方法等,这些都是需要进一步研究解决的问题。成功的经验需要总结,使之成为可供作业时的基本技术、工作规范或重要参考;不成功乃至失败的实践与教训也应认真对待,积极总结,以免重蹈覆辙,从反面总结出正确的方法和道路;尚未解释清楚和解决的问题,需要敢于直接面对,解剖它,采用新的思路和方法,逐步地寻找到合理的解释和可行的解决方法。如此,实事求是,使之科学化和实效化。当然,我们不能强不可为而为之,只能顺自然规律而行事,因势利导。

“人工增雨研究专辑”的主旨就在于介绍一些成功的研究与作业典型经验,以利于推广或参考;同时就现阶段的发展需要而且有可能在一定程度上解决的一些问题提出一些建议。当然,这只是本专辑三个主编的个人见解,聊起抛砖引玉之效,希望读者批评指正,引起争鸣,共同切磋,探

求真理,藉以在提高人工影响天气科学化方面有所前进。

2 较普适的一些成功经验及其分析讨论

2.1 可控性条件

人类干预的能力毕竟比自然力小得多,要进行人工增雨,应顺应自然规律,因势利导,进行作业才易于成功,得到增雨之效。如何获知这些有利于作业的条件?按各地的经验,如果不凭作业指挥者的个体化主观性的判据,较好的办法是对历史资料进行考察统计。例如:

(1) 作管辖地区有利于人工增雨的气候背景统计分析。例如对在一定的不太小的区域内能形成降雨的天气系统和过程,以及相应的降水地域(当然还有地理环境条件在内)作历史统计分析,找出达到一定降水量阈值的条件(李蔼恂等, 2012; 刘健等, 2012; 宋薇等, 2012; 王晓玲和任燕, 2012)。山西省人工影响天气办公室称之为潜在增雨作业日和相应的作业区(孙鸿娉等, 2012)。不难想象,在满足这种条件下进行作业,增雨把握较大。不过,这只是易于人工增雨的有利条件,而非充分条件。在这种条件下进行作业是否增雨却是不能简单地加以判断的;即使降雨,也不易于检查有多少是自然降水、又有多少是人工增加的。甚至人工干预有可能是无效的,不能贪天功为己有。此外,严格来说,这也不是人工增雨有效的必要条件,特别是就局地小范围来说,夏日对流较旺盛时,积状云出现地点有偶然性,能否下雨和能否催化使其下雨也带有偶然性,不能全由统计量来推出。

(2) 直接对云的性状进行统计分析,找出各类能形成降水的条件及其落区,以及找出描写相应性

状参数的阈值。这有许多经验, 如对雷达回波的统计相关分析(唐仁茂等, 2012), 由卫星遥感反演出的云特性相关分析等(刘贵华等, 2012; 徐小红等, 2012)。

我们认为, 最好将(1)和(2)结合起来, 这也不难做到。因为云系及其性状大都由相应的天气系统及地理环境所基本决定, 即(1)是第一位的, 而(2)是拟再深入一步的, 企图了解云雨内的微物理特性。不过, 由雷达回波反演云雨特性的准确度目前尚不很高, 而当今由卫星遥感资料反演云的特性参数作研究尝试未尝不可, 但其中假设条件太多, 现在尚无(至少是缺乏足够的)实测验证, 以之作为参考尚可, 而作为可否进行作业的依据则有风险。

(3)作相应的数值模拟以认识相应的机理。我国有不少工作是探索人工影响天气机理的数值模拟研究, 有用区域或中尺度数值天气预报模式的, 也有用云分辨模式甚至云中过程精细表达的模式做的, 结果都颇有新意和阐发(陈宝君等, 2012; 齐彦斌等, 2012a, 2012b; 肖辉等, 2012; 杨洁帆等, 2012; 赵震和雷恒池, 2012), 进一步的工作最好能结合(1)和(2)。无论是对(1)或(2), 不妨选出其中有利于增雨的典型甚至全部个例。使用局域或更精细的中小尺度天气动力学等模式, 进行自然过程和施加人工影响的数值试验, 进行对比并作统计, 一则可了解到相应过程的增雨的机理, 二则可对效果给出一种统计检验的方法。当然, 这里有预报模式的误差问题, 预报模式要足够好, 而且如何区分自然降水和人工增量问题也有复杂性, 将在第3节叙述。

2.2 临近作业前的决断和作业方式

天气形势和云的性状是随时间而变的, 必须在临近作业前做出决断, 甚至要在整个作业过程时段内适时做出调整。这种决断和适时调整, 目前大多是由指挥人员主观的或结合部分客观资料进行判断。尤其是后者, 我国目前已有可喜的经验, 即作业临近时或进行时根据雷达回波资料判断云内微物理特性, 作成软件以指导作业(唐仁茂等, 2012)。很重要的一点是, 这里其实已初步用到了观测与作业决策的反馈, 是使作业科学化的重要方向, 不过主观成分相当大, 是应该进一步客观化的, 将在第3节进一步讨论^①。

^①湖北省的经验是较客观地选择了对比云(以作效果检查), 但对选择可以或应该进行作业的云却未给出定量判据。

2.3 作业效果的初步检查

作业效果检查, 即是否增雨和增雨量的量化, 是目前最难然而也是最需解决的问题, 做不到这点不能是真正的可说清楚的科学技术。我国的从业人员知难而进, 也发明了一些间接检验人工增云效果的好方法和好经验, 这比国外相当普遍使用的随机统计检验方法要进了一大步(Silverman, 2003; 王婉和姚展予, 2012; 王以琳等, 2012)。主要有两种方法, 即统计检验和物理检验。

采用统计检验法的比较多, 如福建的古田水库对流云随机催化试验(曾光平等, 1991, 1994)以及在国内其它区域开展的检验(房彬等, 2005; 王婉和姚展予, 2012; 王以琳等, 2012)。即对云型相类似的两块或两区, 一施以人工影响作业, 另一则不进行作业, 检验二者相应的云中特性变化(如雷达回波是否有利于降水)和观测作了增雨作业的云区相应地区是否下雨或雨量增加。这些都有一定的说服力。

另一方法是物理检验法, 包括各种针对人工增雨催化作业后云体的变化假设而开展的各种有针对性的观测, 如果观测证明了催化云按照假设发生了变化, 则认为作业有效, 如雷达回波强度的变化(金德镇等, 2007)、云粒子谱的变化(王以琳和雷恒池, 2003; 金华等, 2012), 但不能严格直接证明催化作业增雨的效果, 更不能回答增雨量的多少。

也许用示踪法是有用的, 即在播撒剂中加入示踪物质(吴琳等, 2012), 或在云或雨滴中取样检测是否有播撒剂或在空中有播撒剂的剩余物, 如有则是物证, 至少定性说明对云有作用。如在云区域或在大量云滴中被检测到, 还可说明影响的程度。不过这也只能算是间接的检验。不能说明不进行作业就不下雨, 也不能说明作业增大了多少降雨。但示踪法是值得试验的, 至少和上面两种方法可以相互补充和验证。

2.4 云微物理结构和凝结核的观测研究

云宏观、微观结构及降水形成机理是决定人工增雨作业是否有效的基础。近年来国内进行了大量的云结构的观察研究(雷恒池等, 2008; 侯团结等, 2011; 马新成等, 2012; 齐彦斌等, 2012a, 2012b), 对我国北方地区飞机人工增雨作业主要云系——层状降水系统的结构和降水形成机理认识更为深刻。飞机观测表明, 层状降水云系存在3层结构, 各层厚度不同, 对地面降水的影响也不相同(Hou

et al., 2010)。由于降水云系的结构不同,在选择人工增雨作业方案时,首先要了解云系的宏、微观结构,才可能最大限度的发挥人工催化功效。对云的结构观测研究,理应是一个长期的研究任务,期望通过大量的个例研究,能够对确定区域飞机人工催化云系总结出相应的作业指标,以提高人工增雨作业的针对性。

已有不少在地面和空中以及在云中采样分析可以形成云滴的各种凝结核(简称“云凝结核”)及其尺寸谱的分布(封秋娟等, 2012; 周德平等, 2012),这无疑是对成云条件的基础性观测工作,而且由于仪器的精密,这种观测的精度也较高。如能在云内外和雨区内外较广大地区都作这项观测,则凝结核本身就是一种示踪物,由此可推知核的源区及其传播方式,有助于 2.1 节和 2.3 节的工作。不过,这中间还有很多不简单的环节需要研究探明。此外,对云滴和落到地面的雨滴谱(不论作业与否)的观测也有相当进展(李义宇等, 2012),这属于云雨物理的基础研究,是必不可少的。

2.5 新播撒剂的研究

我国大规模的混合相云人工增雨作业,基本上是根据贝吉龙机理(Bergeron, 1935),主要采用碘化银催化剂(播撒剂),用飞机、高炮或火箭带入云中,还有部分飞机催化作业使用的是制冷剂。关于催化剂的制作及其改进有许多很好经验。更可喜的是,金德镇等(2012a, 2012b)、张景红等(2012)研制出的纳米碘化银催化剂比传统碘化银颗粒具有更高的成核率,在云室试验中已经得到验证,这是很大的进步。我们建议:现在亟须做两件事,一是使制作工艺尽快进入中试,二是尽快在自然界作实验,给出与通用碘化银催化剂的对比实验结果。

3 提高作业和效果评估科学化的一些建议

进一步提高我国人工增雨作业和效果评估的科学化是重要的而且是完全可以达到的。在上节中,我们在综述一些有普遍意义的经验和成果的同时,已作了一些分析和讨论,在单项上都提出了一些可以进一步提高科学化的建议。下面再就全局性的提高科学化,提一些建议。

3.1 做到观测—预报—作业—效果检验一体化

对于人工增雨任务的直接提法是:要求在地理

区域(记作 S)增加雨量(记作 ΔP),应该在什么三度空间范围(记作 Ω_a)和什么时段(记作 $[t_1, t_2]$)进行什么方式的作业(记作 A)才能达到目的?作业是否成功?直接的检验是:作业后效果是否使 $\Delta P > 0$ 。如果能做到,对作业的进一步要求是使 ΔP 最大,或者使人文—经济效益(记作 Q)最大。这正是控制论的范畴,可以应用(或参考)控制论的理论方法来解决这问题(雷恒池等, 2012; 吴琳等, 2012; 曾庆存等, 2012)。

简洁地说,控制论方法将作业(控制方法)和效果检验(是否能达到目标)有机地结合起来,即通过观测(监测),用监测数据反馈到作业系统,不断按此调整作业,使达到目的或效果最优。反馈回路是最主要的特征,这点是现有人工增雨作业中没有全面做到(只有部分考虑到),也没有直接针对增雨这目标本身。此外,现有的行之有效的工程控制论方法,控制的对象与其所处的环境基本上是没有相互作用的,控制时只需把环境的变化当作噪音干扰来处理,控制技术包括有容错和抗干扰的元件。但是与人工增雨相关的问题都是控制的对象(例如云),正是整个环境的一部分(例如天气系统),环境变化却是未知而须预报的,故预报也应是作业中必须考虑的一环。可见,观测同时保证预报和作业的正确方式,故要使作业 A 达到在 S 上增雨($\Delta P > 0$)和效果最优(ΔP 或 Q 最大)的目的,就必须作到观测—预报—作业(包括方案的制定、执行和调整)—效果检验一体化。这就是我们建议的自然控制方法,目前完全可以做到。这方法也可以分步进行,即把作业从全局把握(方案)和局部执行实施,后者可以在短时将环境看作已知,直接应用工程控制论的技术和方法。

3.2 暖云催化作业和研究

暖云人工增雨作业所使用的催化剂一般称之为吸湿性催化剂(Hygroscopic),以盐粒为主要成份。早在我国开展人工影响天气活动之初,顾震潮等(1962)就曾经提出过根据云的厚度、含水量的多寡来选择播撒剂量和播撒部位,以达到最优的催化效果。近年来,关于暖云人工增雨作业的研究工作很多,具体可以分为3种理论(Bruintjes, 1999; Silverman, 2003; Drofa et al., 2010),其一为直接播撒雨滴胚胎(粒子尺度 $> 10 \mu\text{m}$),通过碰并过程增加降水;其二为播撒 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 的粒子,使得云滴增大滴端尺度增加,启动重力碰并过程;其三在云底

播撒粒径为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 左右的云凝结核 (Cloud condensation nuclei, CCN), 通过“利益竞争”, 使得气溶胶中粒径较小的CCN不能够活化, 从而改变云微观结构, 使得云滴谱展宽, 使得大滴数量增加。上述工作都仅仅针对影响暖云微物理过程而言, 忽略了动力过程。而Rosenfeld (2007) 则提出了通过在云底大剂量播撒小的凝结核, 延缓对流云暖云碰并过程, 使云体发展到混合相的高度、使云体发展更为强盛、生命期延长, 这其中部分考虑了云的动力过程, 但忽略了大气层结的稳定度, 也不是普适的。其实局地暖性对流云发展, 能量来自大气层结, 所以必须考虑云的动力过程。在暖云人工增雨作业的实践中, 还有很多问题需要进一步研究。

3.3 必须将基础和理论与研究与作业实践紧密结合起来

现有的基础和理论与研究与作业实践二者的结合尚不密切, 前者主要是用数值模拟方法, 或作个例分析。在第2节中已指出, 既然我国已有大量的实践经验, 积累了大批有人工影响的资料, 如果基础和理论研究工作能针对这样丰富的经验进行研究和总结, 相信一定能找到新的规律, 从而指导作业水平进一步提高。

3.4 气象与水利部门充分合作, 解决好作为四度空间的水资源合理或最佳利用

必须指出, 淡水是四度空间的资源, 即资源量随三度空间 (地区和地势环境) 和时间而变化的。无下雨条件时求也求不来, 少雨区也不可能有足够多的水自天而降, 即不可能当时和就地增加水资源, 只能作四度空间的调剂: 在有利的时间和地区人工增雨, 通过水利工程设施在有利的地区和时段贮水, 调剂到少雨或少水的时间和地区, 统一运筹, 方能得到最好结果。各部门通力合作, 这是完全应该而且可以做到的。

4 其他一些人工影响天气问题

我国还有其他一些人工影响天气的大规模作业的成功经验, 十分值得总结和提高。例如人工防雹作业, 遍布全国各地, 作业的效果大都能消雹, 而且得到人民群众和政府的信赖。其实, 雹灾的出现既多带地域性并与天气条件密切相关, 又易于为雷达测出, 作业效果之有无可直接由是否降雹检验。由于雹云多群起于某地域, 而后随气流移动,

存在时间也不很长。成功的经验有设置数道防雹作业线, 阵地发射, 如防空炮火网, 这些都是科学的。至于消雹的机理尚有不明确之处, 需要进一步深入研究, 尤其是冰雹云的早期识别。

另一个是消雾, 尤其是消冷雾, 我国有一些作业试验, 我们认为应作大规模试验, 如在机场、大城市的交通网、在长途高速公路。消雾的机理与人工增雨原理相同, 就是使雾中水滴迅速长大降下。雾出现多是稳定的天气系统, 一旦出现, 对天气预报的要求可以大大降低, 消雾的成功率较好, 剩下的主要是作业的规划问题, 其可行性是更容易些的, 其人文—经济效益甚至大于人工降雨。

还有, 则是防雷。现在气象部门承担着防雷任务, 也许这里最主要的是天气预报问题, 是防雷电之灾, 而不大可能消雷电, 防雷电的损害任务应由电力部门和城建部门承担。

至于大气污染的预报和调控, 森林防火, 滑坡与泥石流的预报与防治, 水利工程的调度, 风能和太阳能等气象资源的优化利用, 依赖于自然环境的经济部门的规划 (尤其是农业的规划调度) 等, 无一不与气象条件有关, 虽然这些与人工影响天气作业关系不大, 却是属于自然控制论应该研究的范畴, 同样是必须预报和调控同时进行, 有别于现有的工程控制论, 将另文探讨。

参考文献 (References)

- Bergeron T. 1935. On the physics of cloud and precipitation [C]// Proc-Verbaux Assoc.: Meteor. Intl. Union Geodesy Geophys., 5th General Assembly, Lisbon, 1933, Paris, 1935, 156–178.
- Bruinjtjes R T. 1999. A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80 (5): 805–820.
- 陈宝君, 郑凯琳, 郭学良. 2012. 超级单体风暴中大冰雹增长机制的模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 767–778. Chen Baojun, Zheng Kailin, Guo Xueliang. 2012. Numerical investigation on the growth of large hail in a simulated supercell thunderstorm [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 767–778.
- Drofa A S, Ivanov V N, Rosenfeld D, et al. 2010. Studying an effect of salt powder seeding used for precipitation enhancement from convective clouds [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 10 (16): 8011–8023.
- 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 Bin, Xiao Hui, Wang Zhenhui, et al. 2005. Application of cluster analysis to the statistical assessment of the effect of artificial rain enhancement [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28 (6): 739–745.
- 封秋娟, 李义宇, 李培仁, 等. 2012. 山西云微物理特征的地面观测 [J].

- 气候与环境研究, 17 (6): 727–739. Feng Qiujuan, Li Yiyu, Li Peiren, et al. 2012. Ground observation of microphysical properties in Shanxi Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 727–739.
- 顾震潮, 王尧奇, 温景嵩, 等. 1962. 对流性暖云人工降水作业中撒药部位与撒药颗粒对撒布效率影响的初步理论研究 [M]// 我国云雾降水微物理特征问题. 北京: 科学出版社, 64–88. Gu Zhenchao, Wang Yaoqi, Wen Jingsong, et al. Preliminary theoretical studies on cloud seeding effect of seeding position and particle size for warm convective cloud precipitation enhancement operation [M]// Characteristic Problem of Cloud Precipitation Microphysics in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 64–88.
- Hou T J, Lei H C, Hu Z X. 2010. A comparative study of the microstructure and precipitation mechanisms for two stratiform clouds in China [J]. Atmospheric Research, 96 (3–4): 447–460.
- 侯团结, 胡朝霞, 雷恒池. 2011. 吉林一次降水层状云的结构和物理过程研究 [J]. 气象学报, 63 (3): 508–520. Hou Tuanjie, Hu Zhaoxia, Lei Hengchi. 2011. A study of the structure and microphysical processes of a precipitating stratiform cloud in Jilin [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 69 (3): 508–520.
- 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 Dezhen, Lei Hengchi, Zheng Jiaoheng, et al. 2007. Observation research on cloud microphysics and precipitation affection of stratiform cloud seeding by liquid carbon dioxide [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (1): 99–108.
- 金德镇, 张景红, 江中浩, 等. 2012a. 纳米碘化银在人工影响天气的应用研究 I: 理论分析结果和展望 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 666–670. Jin Dezhen, Zhang Jinghong, Jiang Zhonghao, et al. 2012a. Application of nano-AgI catalyst in weather modification. I: Result of theoretical analysis and prospect [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 666–670.
- 金德镇, 张景红, 江中浩, 等. 2012b. 纳米碘化银在人工影响天气的应用研究 II: 室内实验 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 671–677. Jin Dezhen, Zhang Jinghong, Jiang Zhonghao, et al. 2012b. Application of nano-AgI catalyst in weather modification. II: Laboratory experiment [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 671–677.
- 金华, 黄梦宇, 于潇洵, 等. 2012. 一次飞机播撒吸湿性焰剂试验的微物理探测浅析 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 704–710. Jin Hua, Huang Mengyu, Yu Xiaowei, et al. 2012. Preliminary analysis of in-situ measurements in warm cloud after seeding with hygroscopic flares [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 704–710.
- 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 967–974. Lei Hengchi, Hong Yanchao, Zhao Zhen, et al. 2008. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 967–974.
- 雷恒池, 魏蕾, 曾庆存. 2012. 控制论与人工影响天气 I. 人工增雨作业中的正反问题及最优调控 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 968–978. Lei Hengchi, Wei Lei, Zeng Qingcun. 2012. Cybernetics in the artificial weather modification. I: Direct and inverse or optimal controlling problem for precipitation enhancement operation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 968–978.
- 李嵩恂, 肖辉, 周筠珏, 等. 2012. 河南省春、秋季降水时空变化的特征研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 884–896. Li Aixun, Xiao Hui, Zhou Junjun, et al. 2012. Characteristics of spatio-temporal distribution of spring and autumn precipitation in Henan Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 884–896.
- 李义宇, 杨俊梅, 李培仁, 等. 2012. 山西省层状云微物理结构探测分析 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 693–703. Li Yiyu, Yang Junmei, Li Peiren, et al. 2012. Detection analysis of microphysical structure of stratiform cloud in Shanxi Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 693–703.
- 刘贵华, 余兴, 岳治国, 等. 2012. 卫星遥感人工增雨作业条件 II: 层状云 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 758–766. Liu Guihua, Yu Xing, Yue Zhiguo, et al. 2012. Seeding conditions of precipitation enhancement revealed by multiple spectral data of satellite. II: Super-cooled layer clouds [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 758–766.
- 刘健, 金德镇, 陈万奎. 2012. 吉林省自然降水转化因子的初步研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 897–902. Liu Jian, Jin Dezhen, Chen Wangkui. 2012. Conversion factor of natural precipitation in Jilin Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 897–902.
- 马新成, 黄梦宇, 于潇洵, 等. 2012. 一次副热带高压后部层状云降水中山区层状云宏微物理结构探测分析 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 711–718. Ma Xincheng, Huang Mengyu, Yu Xiaowei, et al. 2012. An observational study of macro/microphysical structures of stratiform cloud in a high-pressure system rear over mountain [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 711–718.
- 齐彦斌, 陶玥, 洪延超, 等. 2012a. 东北冷涡中尺度云系降水机制研究 I. 观测分析 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 683–692. Qi Yanbin, Tao Yue, Hong Yanco, et al. 2012a. Precipitation mechanism of mesoscale cloud system in a cold vortex over Northeast China. I: Observational analysis [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 683–692.
- 齐彦斌, 陶玥, 冉令坤, 等. 2012b. 东北冷涡中尺度云系降水机制研究 II: 数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 797–808. Qi Yanbin, Tao Yue, Ran Lingkun, et al. 2012b. Precipitation mechanism of mesoscale cloud system in a cold vortex over Northeast China. II: Numerical simulation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 797–808.
- Rosenfeld D. 2007. New insights to cloud seeding for enhancing precipitation and for hail suppression [J]. The Journal of Weather Modification, 39: 61–69.
- Silverman B A. 2003. A critical assessment of hygroscopic seeding of convective clouds for rainfall enhancement [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 84 (9): 1219–1230.
- 宋薇, 靳瑞军, 孟辉, 等. 2012. 近年天津地区冰雹、雷暴天气特征研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 919–924. Song Wei, Jin Ruijun, Meng Hui, et al. 2012. Analysis of hailstone and thunderstorm characteristics in Tianjin during recent years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 919–924.
- 孙鸿娉, 李培仁, 王功娃, 等. 2012. 山西省人工增雨天气条件研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 903–910. Sun Hongping, Li Peiren, Wang Gongwa, et al. 2012. Precipitation enhancement weather condition research in Shanxi Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 903–910.

- 唐仁茂, 李德俊, 袁正腾, 等. 2012. 对流云人工增雨雷达效果分析软件的应用 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 871–883. Tang Renmao, Li Dejun, Yuan Zhengteng, et al. 2012. Application of seeding effect analysis software for convective cloud rainfall enhancement with radar products [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 871–883.
- 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 Wan, Yao Zhanyu. 2012. Numerical analysis of statistical power in precipitation enhancement experiment in Beijing and estimation of operational cloud seeding effectiveness [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 855–861.
- 王晓玲, 任燕. 2012. 秦岭山区近 50 a 降水差异及可能局地成因探讨 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 911–918. Wang Xiaoling, Ren Yan. 2012. Analysis of precipitation differences and their local causes in the last 50 years around the Qinling Mountains [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 911–918.
- 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 Yilin, Lei Hengchi. 2003. Test of cold cloud seeding [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (5): 929–938, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.05.14.
- 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 Yilin, Li Desheng, Liu Shijun. 2012. Stratified sampling historical regression method for aircraft precipitation enhancement effect test [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 862–870.
- 吴琳, 曾庆存, 洪钟祥. 2012. 控制论与人工影响天气 II: 工程控制论在人工增雨作业中的应用与建模 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 979–985. Wu Lin, Zeng Qingcun, Hong Zhongxiang. 2012. Cybernetics in the artificial weather modification. II: Application of engineering control theory in weather modification and its modeling [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 979–985.
- 肖辉, 杨慧玲, 洪延超, 等. 2012. 大气冰核谱分布对对流风暴云人工催化影响的数值模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 833–847. Xiao Hui, Yang Huiling, Hong Yanchao. 2012. Numerical simulation of the impacts of ice nucleus spectra on cloud seeding effects in convective storm clouds [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 833–847.
- 徐小红, 余兴, 朱延年, 等. 2012. 卫星遥感人工增雨作业条件 I: 对流云 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 747–757. Xu Xiaohong, Yu Xing, Liu Guihua, et al. 2012. Seeding condition of precipitation enhancement revealed by multiple spectral data of satellite. I: Convective clouds [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 747–757.
- 杨洁帆, 雷恒池, 张云. 2012. 巨盐核对云滴活化影响的数值模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 789–796. Yang Jiefan, Lei Hengchi, Zhang Yun. 2012. Numerical simulation of the impact of giant cloud nuclei on cloud droplet activation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 789–796.
- 曾光平, 方仕珍, 肖锋. 1991. 1975–1986 年古田水库人工降水效果总分析 [J]. 大气科学, 15 (4): 97–107. Zeng Guangping, Fang Shizhen, Xiao Feng. 1991. The total analysis of the effect of artificial rainfall in Gutian reservoir area, Fujian (1975–1986) [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 15 (4): 97–107.
- 曾光平, 郑行照, 方仕珍, 等. 1994. 非随机化人工降雨试验效果评价方法研究 [J]. 大气科学, 18 (2): 233–242. Zeng Guangping, Zheng Xingzhao, Fang Shizhen, et al. 1994. Research on the method of evaluating the efficiency of the non-randomized artificial precipitation experiments [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 18 (2): 233–242.
- 曾庆存, 吴琳, 洪钟祥. 2012. 控制论与人工影响天气 III: 自然控制论在人工增雨作业中的应用框架 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 986–990. Zeng Qingcun, Wu Lin, Hong Zhongxiang. 2012. Cybernetics in the artificial weather modification. III: A framework of artificial weather modification based on the natural cybernetics [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 986–990.
- 张景红, 金德镇, 江中浩, 等. 2012. 纳米碘化银在人工影响天气的应用研究 III: 表征实验研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 678–682. Zhang Jinghong, Jin Dezhen, Jiang Zhonghao, et al. 2012. Application of nano-AgI catalyst in weather modification. III: Experimental characterization [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 678–682.
- 赵震, 雷恒池. 2012. 层状云系催化增雨的中尺度模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 779–788. Zhao Zhen, Lei Hengchi. 2012. Numerical simulation of precipitation enhancement by stratiform cloud seeding using a mesoscale model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 779–788.
- 周德平, 洪也, 王扬锋, 等. 2012. 沈阳春夏季大气冰核浓度的观测研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 719–726. Zhou Deping, Hong Ye, Wang Yangfeng, et al. 2012. An observational study of atmospheric ice nuclei concentration in spring and summer in Shenyang [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 719–726.