

云降水和人工影响天气催化数值模式的发展及应用

楼小凤 师宇 李集明

(中国气象科学研究院, 中国气象局云雾物理开放实验室, 北京 100081)

摘要: 对云降水和人工影响天气催化数值模式的发展和进行了概述。云降水模式包括总体水模式和分档模式。催化模式分为成冰剂、吸湿性催化剂和致冷剂催化模式。部分云模式和催化模式与中尺度天气模式实现了耦合。云降水模式在人工影响天气中得到了广泛应用, 并在人工影响天气外场业务作业中发挥了重要作用。

关键词: 云降水模式, 人工影响天气催化模式, 发展和应用

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.010

Development and Application of the Cloud and Seeding Models in Weather Modification

Lou Xiaofeng, Shi Yu, Li Jiming

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: The development and application of the cloud and seeding models in weather modification are introduced. The cloud models include bulk water models and bin models, The seeding models involve three types of seeding materials: glaciogenic materials, hygroscopic particles and coolants. Some of these models are coupled with meso-scale models. The cloud and seeding models are widely used in research works of rain enhancement, hail suppression, for dissipation, rain reduction, and are in important role in operational field weather modification activities.

Keywords: cloud models, seeding models, development and application

0 引言

现代人工影响天气始于1946年, 云模式于1959年开始出现, 但早期的云模式中没有凝结过程, 仅仅是一个暖的热气团^[1]。随后云模式的发展经历了0维、一维、二维、三维和时间定常及时间非定常的演变过程^[2]。目前已经发展出了详细双参数总体水模式及分档模式。云数值模式已经在人工影响天气研究以及人工影响天气理论、播撒技术等方面得到了广泛应用^[3-5]。利用数值模式在静力催化、增雨和防雹的正相关催化效果、微物理过程和动力过程的相互作用、催化时间窗口、催化效果和过量催化概念等方面都取得了非常重要的理论发展^[6]。

云降水数值模式是人工影响天气研究中的一个关键组成部分。模式能够在相同的云况下比较播云与否的异同, 进而明确播云的效果, 也可用这些程序来重建过去播云试验条件, 计算其应有的播云效果。这些程序也可用来模拟播云物质的扩散路径, 提供外场试验和作业所需的实时预报, 在作业区外检验播云后的潜在效应, 也有助于进行人工影响天气试验的统计分析。随着计算能力的提高, 具有详细云物理过程和资料同化功能的数值模式已经应用于人工影响天气业务。随着云降水微物理过程认识的不断深入, 可以降低人工影响天气工作的很多不确定性, 提升业务能力和科技水平^[7]。

我国近几年在人工影响天气和云降水数值模式方面做了大量研究, 也有多篇相关的综述性论文发表^[8-11]。本文将着眼于云降水和催化数值模式, 介绍这些模式在人工增雨、人工防雹、人工消减雨和人工消雾等方面的研究, 并介绍模式在人工影响天气外场试验和作业中的应用。

收稿日期: 2014年9月22日; 修回日期: 2016年5月6日
 第一作者: 楼小凤(1969—), Email: louxf@camsma.cn
 资助信息: 公益类行业(气象)科研专项(GYHY201406001); 中国气象科学研究院基本科研业务研究专项(2011Z005和2013Z009); 国家自然科学基金项目(41275148)

1 云降水数值模式

云降水模式是将云的动力学方程和微物理方程,结合观测和实验结果联合求解,模拟云降水的发展演变过程。根据云降水模式的动力框架,可归纳为一维模式(包括一维定常模式和时变模式)、二维轴对称时变模式和平面对称时变模式、三维时变模式^[2]。模式发展经历了从简单到复杂,从一维到三维的过程,其中计算能力的发展是一个重要原因。在云模式发展的初期,建立了多种一维云模式和二维云模式,直到1970年代以后随着计算机性能的提高,三维云模式才得以建立。最早三维云模式是加拿大的Steiner^[12]在1973年建立的浅对流无降水的三维云模式,仅考虑了一个方向上的风切变。后来,深对流、滞弹性的三维模式得到了发展。1970年代后期,Klemp等^[13]采用保留声波的完全弹性原始方程三维模式,将声波和其他慢波分离求解的分裂时步积分方案,提高了计算效率。Cotton等^[14]也建立了这种动力结构的完全弹性三维模式。1990年王谦等^[15]、许焕斌等^[16]和孔凡铀等^[17]也先后建立了三维模式。

云物理学中描述水凝物粒子群尺度谱演变特征的方法可分为总体水法和分档法。分档法按各类粒子的尺度或质量大小进行分档,建立控制方程,模拟计算各档粒子的生长演变过程,计算量非常大。总体水法只考虑它们的总体特征,建立各类云和降水粒子总体参量的控制方程。云模式发展的初期为单参数方案,仅模拟计算水成物的比质量^[1, 18-19]。随着计算能力的加强,发展出了对粒子比质量和数浓度都模拟计算的双参数方案^[16, 20-21]。Milbrandt等^[22]在2005年首次成功地发展了三参数总体水模式,在水成物比质量和数浓度的基础上诊断水成物粒子分布谱的形状参数。

云方案根据粒子相态,分为暖云方案和混合相云方案。暖云方案只考虑水滴即云水和雨水。混合相云方案将水凝物分为云水、雨水、冰晶、雪、霰和雹等。

下面简略介绍微物理过程发展比较完善且目前在世界上广泛使用的几个非静力平衡中小尺度云数值模式。

1) NASA的GCEM (Goddard Cumulus Ensemble Model) 模式,采用双参数混合相4种冰粒子总体水方案^[23]。模式预报计算了冰晶、雪、霰和冻滴或雹的数浓度和比质量,同时还计算了在湿降水冰粒子上的液态水的比质量。混合相4种冰粒子方案较成功地模拟了中纬度飚线的回波、微物理结构。后来在模式中耦合了分档方案^[24]。

2) RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) 模式,由美国Colorado州立大学研发的中尺

度模式^[25]。模式主要应用于大涡湍流、暴雨、对流云、中尺度对流系统、中纬度卷云、冬季暴雨、机械和热强迫中尺度系统和中小尺度大气扩散等的数值模拟。模式中考虑了云凝结核(CCN、GCCN)和冰核(IN)对云和降水的影响^[26]。

3) 中国气象科学研究院(CAMS)的层状云模式和对流云模式。胡志晋等^[20]在1986年发展了双参数混合相层状云模式,考虑云水比水量,雨、冰、雪比水量和比浓度。1987年胡志晋等^[21]发展了双参数混合相对流云模式,模式模拟计算云水比水量,雨、冰、霰和雹的比水量和比浓度。1990年王谦等^[15]发展了三维云模式。1993年刘玉宝等^[27]建立了双向套网格、变网格距准弹性中 β - γ 大气模式。2002年在原方案的基础上利用准隐式格式的计算方法,发展了新CAMS云方案,对包括云水、雨水、冰晶、雪和霰等11个云物理量进行计算^[28-29]。2011年在CAMS云方案的基础上发展了双参数冰雹云微物理方案^[30]。

4) 中科院大气所层状云和对流云模式及其分档模式。肖辉等^[31]在粒子浓度和含盐量的预报方程中加入云滴碰并过程,将水滴按大小进行分档。孔凡铀等^[17]在1990年建立了完全弹性三维冷云模式。洪延超^[32]建立了对云滴、雨、冰晶、雪和霰5种粒子比含水量和比浓度计算模式。郭学良等^[33]建立了一维雨滴分档模式,雨滴的直径从100 μm 到6mm分成37档。2001年,建立和发展了一个包括云滴、云冰、雨滴、雪团、霰和雹的方案,将霰与冰雹按照指数分档方法划分为21档(100 μm ~7cm)^[34]。

5) 总参大气研究所许焕斌等^[35]建立了二维冰雹云模式。云中粒子有云水、雨水、冻雨和冰雹。1990年,发展了三维冰雹云模式。随后建立了三维粒子增长运行模式,比较完善地描述了粒子的增长及密度和落速的变化^[16]。

6) 以色列的二维面对称非静力分档云模式模拟CCN、各种水成物的比浓度及比质量的云动力学过程^[36]。模式中考虑的水成物主要有水滴、冰晶、霰、雪花4种。各种水成物粒子均分为34档,气溶胶分为57档。

2 人工影响天气催化模式

人工影响天气催化模式是在云降水模式的基础上,通过添加不同的催化过程而形成的具有催化能力的模式,包括吸湿性催化剂催化模式、AgI类成冰剂催化模式和致冷剂催化模式。

2.1 AgI类催化剂催化模式

黄燕等^[37]在二维冰雹云模式中引入冰晶浓度和

播撒物质AgI粒子的方程,考虑了人工冰核凝华核化(包含凝结-冻结核化)及与云、雨滴的接触冻结核化。Meyers等^[38]在1995年首次在RAMS模式中耦合了DeMott^[39]在室内实验中AgI的凝华核化、接触冻结核化和浸没冻结核化四种核化机制的催化模块。刘诗军等^[40]在层状云模式中发展了包含AgI四种成核机制的成核过程模块。

杨洁帆等^[41]使用包含详细微物理过程的一维层状云全分档模式,加入AgI焰剂催化方案。Curic等^[42]在ARPS模式中耦合了考虑凝华和接触冻结核化的AgI催化模块。刘卫国等^[43]也在ARPS模式中增加冰雹过程的基础上耦合了AgI催化过程。李兴宇等^[44]在三维冰雹云催化模式中将人工引入冰晶单独作为预报量处理,发现改进后的模式催化效果优于原模式。

方春刚等^[45]在中尺度模式系统(WRF)的Thompson方案中添加了AgI预报方程,形成适合人工影响天气的中尺度催化数值模式,并开展了催化模拟试验。何晖等^[46]在中尺度WRF模式的Morrison双参数方案中引入了AgI粒子与云相互作用的过程。Xue等^[47-48]也将AgI模块与WRF进行了耦合,并模拟了地面燃烧炉的催化模拟试验。

2.2 吸湿性核催化模式

胡志晋等^[49]在1979年发展了盐粉催化暖雨模式,假定盐粉进云之后通过凝结碰并过程很快长大成雨滴。楼小凤等^[49]在此基础上发展了混合云盐粉催化模式。徐华英等^[50]在1983年也发展了盐粉催化的暖雨模式。

Yin等^[36]发展的二维面对称非静力分档云模式,可以模拟吸湿性核的催化过程。Segal等^[51]利用2000档一维气块谱模式,研究了外场作业使用的吸湿性焰剂的催化效果。

2.3 致冷剂催化模式

致冷剂催化模式包括干冰(固态CO₂)、液态CO₂和液氮(LN)等。Kopp等^[52]在二维对流云模式中发展了干冰催化过程。Fukuta^[53]首次提出了在云中0℃层上方最大过冷水区直接进行液态CO₂水平播撒的方法。我国也开展了在模式中利用致冷剂进行催化模拟试验^[54],并在MM5模式的Reisner2方案中引入了液氮与云相互作用的过程^[55]。

3 云降水和催化模式在人工影响天气中的应用

云降水和催化模式在人工影响天气中主要在云催化的“假设”、“可播性”的评估、外场试验设计、业务决策、效果评估和催化效果的理解等方面发挥了作用^[6, 56]。云模式发展初期就被应用于云催化假设的

发展。云的播散进行的动力激发首先在20世纪40年代进行了观测,后来Simpson等^[57]正是主要利用一维、稳态的云模式验证了“动力催化”的假设,后来的学者们利用多维、时变的模式也不断论述新的云催化假设,例如催化产生云滴谱拓宽等^[52, 58],并进行云催化潜力的评估^[59]。

云降水模式与中尺度模式动力框架进行了耦合,提高了模式对热动力过程和云降水过程的模拟能力。这些中尺度模式包括WRF、中国自主研发的新一代数值预报模式GRAPES、MM5模式和HLAFS有限区域业务预报模式等。这些模式中包含了从简单到复杂的系列总体水显式云物理方案。2005年,分档模式也被耦合到MM5中,分档模式考虑了水滴、三类冰晶、雪团、霰、冰雹及冻雨和CCN,共8类粒子,每类粒子分成33档^[60]。2010年,WRF模式中还耦合了气溶胶分档模式,该模式从液相到固相5类水成物分别分成36档^[61]。这些中尺度模式中也耦合了我国自主研发的云物理方案,形成了HLAFS-CAMS^[62]、GRAPES-CAMS^[29, 63-64]、MM5-CAMS^[28-29]和WRF-CAMS等模式^[65]。

利用云降水模式和耦合了云降水模式的中尺度模式,可以预报云的发展、类型、降水量、雷达反射率回波,以及进行催化云与自然云的不同模拟,在实际人工影响天气业务作业之前预测催化效果,便于进行业务决策。多年来科研人员也一直在利用人工影响天气模式,在人工增雨、人工防雹、人工消减雨和人工消雾等催化方法开展了研究,并将部分研究成果应用到外场科学试验和业务作业中。

3.1 人工增雨催化方法研究

我国典型层状云系的“催化-供给”云可以根据过冷水含量、冰晶浓度和云的暖区含水量以及冰面饱和和水汽来判断人工增雨催化条件^[66]。催化区域要选取过冷水含量高且冰晶含量低的区域^[67]。在最大上升气流区播撒的AgI能够迅速到达过冷水区域,并且减少AgI的出流耗散^[45]。地形云催化高度应尽量选取过冷水最多并且最缺乏冰晶粒子的层次,以达到较好的催化效果^[68]。通过人工引晶催化和AgI催化试验都发现在催化后前30min之内,地面雨量轻微减小,随后净增雨量迅速增加^[46, 69]。催化后累积降雪中心雪量增加,周围出现分散的减雪区^[68]。

对流云增雨催化存在时间窗,最佳的催化时机应该为对流云发展的早期^[70]。人工播撒催化剂应在冰核活化过程大量开始以前进行,以达到增加冰晶浓度,消耗过冷云水,从而增加降水的目的^[71]。火箭发射点相对于目标云的位置及其对应的发射仰角对增雨的效果

影响很大^[72]。在云的发展阶段,应使火箭携带的AgI焰剂播撒段尽可能地横跨云中最大过冷水含量区,而在云发展到成熟阶段之后,应使火箭携带的AgI焰剂播撒段尽可能地横跨云的上升气流区。在云初始阶段播撒增雨范围较广,在云发展阶段播撒增雨范围较集中。播撒冰晶后,云的动力结构发生了改变^[73]。催化后大量潜热的释放,使云中温度增加,上升速度增强^[68]。

Tzivion等^[58]、Reisin等^[74]以及Yin等^[36]对人工增雨的吸湿性催化效果进行了研究,他们指出吸湿性核催化会增加对流云降水。研究发现冰核催化的时间窗很短(仅在自然冰核开始形成的时间催化有效),并且只有催化云顶温度低于 -12°C 的云体,增雨效果可以达到9%~35%。而对吸湿性催化来说,增雨效果可以达到65%~109%,并且对于云顶温度高于 -12°C 的云体也有催化效果。Yin等^[75]指出用大核催化会得到更多的降水,在云发展的早期将催化剂在云底释放可得到最好的催化效果,催化时间过晚会导致降水减少。Segal等^[51]研究发现,在自然暖雨过程效率不高的情况下,播撒吸湿性核后可以增加雨滴的形成。大的云凝结核的催化效果更好,同时自然云中CCN存在时催化效果会有所减弱。

Drofa等^[76]在一维对流云模式中利用以色列研制、经过特殊处理的含有 SiO_2 的NaCl粒子进行催化,发现该盐粉的催化效果比其他吸湿性焰剂的增雨效果好。

人工增雨降温的模拟发现催化后降雨量增加、贴地层气温降低。催化初期,降温主要在下沉气流区,随着云的发展逐渐扩展到更大的范围^[77];催化后地面降水增加、地面气温下降的区域扩大、维持时间延长^[78]。

3.2 人工防雹催化方法研究

通过对我国不同地区不同云底温度的冰雹云自然成雹机制和人工引晶催化防雹模拟^[79],得到了对云底较暖的冰雹云(约 20°C)在上升气流区播撒 10^5 个/kg剂量的人工冰晶就能达到减少降雹,同时增加降雨约25%的效果,而对云底较冷的冰雹云($<10^{\circ}\text{C}$)防雹效果要差一些,但仍能增加部分降水。楼小凤等^[80]发现在云发展的第15分钟,在5km附近播撒AgI,可以减少降雹量约60%,同时可以避免降水量的大幅减少。Curic等^[42]也发现在大于25dBz的冷区进行AgI催化,可以在减雹的同时增加降水。一般在云发展初期(15~20min)、云中上升气流中心播撒AgI粒子会获得消雹效果。减小播撒强度,可以获得增雨作用,但消雹效果变差^[37]。利用干冰和AgI在云顶附近催化,都能减少降雹并少量增加降水,但干冰催化比AgI催化

更能抑制冰雹的形成^[81]。

数值模拟发现雹胚可以是霰粒子,也可以是冻滴^[82],观测中也发现了这一现象。胡朝霞等^[83]发现青藏高原雹云中存在较弱的过冷水累积带,但雹块的增长主要是通过雹撞冻云水。云中冰雹发生和增长的区域与上升气流的关系极为密切^[84]。

通过施加人工抑制上升气流的方法在雹云发展早期将使地面降水量增加,尤其是使降雹量显著减少^[85]。而在发展阶段后期不会导致地面降水明显增加。当抑制强度足够大且范围较大时,只有在发展到旺盛阶段进行人工抑制才能使降雹量和固态降水总量明显减小。无论播撒剂为AgI还是液态 CO_2 ,在最大过冷水区播撒均比在最大上升气流区播撒效果好^[54]。对中等强度及以下的冰雹云,在回波强中心催化即可,对于强冰雹云,一般在冰雹胚胎帘即过冷水累积区中作业效果最好^[86]。

3.3 人工消减雨催化方法研究

利用对流云模式中的AgI催化研究人工缓减强流云降水的可能性,发现在适当的时机对适当的部位进行 2×10^8 个/kg剂量的播撒时,可以减少32%的降水量,也可以减少最大降水中心的雨强^[87]。采用增加人工冰晶的催化方法,在云体成熟期大剂量持续催化的减雨效果最好,催化后霰落速减弱造成雨水减小^[88]。

2008年北京奥运会消减雨试验中发现,AgI播撒率对降水量改变影响明显^[89],当以 $5\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速率持续播撒AgI,最大减雨率为8%~12%,离消雨的要求尚有差距。

利用WRF模式通过播撒亚微米大小的云凝结核影响台风结构和强度,抑制其暖雨过程,催化减弱了地面最大风速,使得台风强风半径缩小了25%^[90]。

3.4 人工消雾催化方法研究

利用二维时变暖雾数值模式研究发现,使用盐粉局部消除暖雾以增大播撒区的能见度是完全可能的。一般来讲,较大的盐粉粒子和较大的播撒量更有利于提高消雾的效果,但消雾的成本以及对环境的污染也随之加大^[91]。利用引入了液氮与云相互作用过程的MM5模式,在北京地区的一次冷雾天气过程中以15g/s的速率播撒作业和在目标区上风方5~6km的地点作业,对能见度的改善最为显著^[55]。利用使部分水滴带电的方法,加速了碰并过程,使得雾能见度有了大幅提高^[92]。

4 人工影响天气数值模式业务系统

近年来,一些云降水模式在人工影响天气外场试验和业务作业中得到了应用。利用模式预报降水和云

物理量场, 并模拟播云物质的扩散轨迹, 提供实时的预报以支持外场试验和作业, 分析播撒区外可能的播云效果, 并帮助统计分析人工影响天气试验的效果。

4.1 四维实时同化—WRF 模式

美国NCAR发展的四维实时同化—WRF (RTFDDA-WRF) 模式^[93], 在催化条件、增雨指标尤其是过冷水及其持续时间方面可以为预报和作业人员提供帮助。模式采用3层嵌套, 最细网格距为2km, 模

式每3h同化并启动一次, 并作出24h的预报, 同时给出催化剂扩散范围和可能的催化点位置(图1)。模式中采用单参数云物理显式方案。模式给出多达24个不同方向和位置水平和垂直剖面, 供外场作业人员使用^[94]。除了用于美国地形云增雪外, 此模式还用于沙特阿拉伯、墨西哥、澳大利亚和西非等国的人工增雨外场试验。

中国气象局人影中心也正在将耦合了CAMS云物

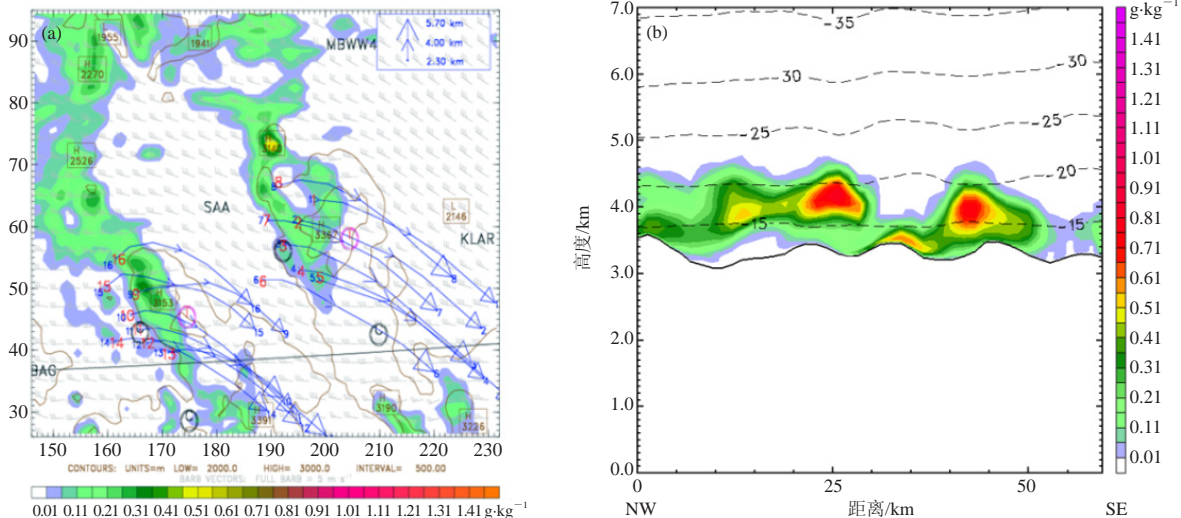


图1 美国四维实时同化—WRF模式输出业务产品图

(a) 模拟的云场和地面燃烧炉出发的前向轨迹图; (b) 模拟的云水和温度垂直分布

Fig. 1 Cycle running outputs of the real-time four-dimensional data assimilation -WRF model

(a) Simulated cloud water fields and forward trajectories from ground-based generators; (b) Vertical distributions of simulated cloud water and temperature fields

理方案的WRF模式进行开发, 以用于预报降水和人工增雨潜力, 并指导外场人工增雨作业。

4.2 MM5-CAMS 模式

中国气象局人影中心将耦合了CAMS云物理方案的MM5 (MM5-CAMS) 模式^[28-29], 自2007年以来一直自动化运行。模式以T213资料为初始场。模式采用2层网格, 水平格距分别为15和5km。模式每天提供36h预报时效的人工影响天气微物理量场和降水预报。模拟结果结合中央气象台的降水预报, 分析和预报具有人工影响天气催化潜力的区域和时段(图2)。MM5业务模式产品除用于全国日常的人工增雨作业决策和指导外, 还用于2008年奥运会开幕式保障、2010年西南五省抗旱服务、2009年60周年国庆阅兵保障、森林灭火等人工影响天气服务中。近年来还开展了ARJ飞机积冰试验保障工作。

4.3 GRAPES-CAMS 模式

国家气象中心研发了一套双参数化混合相云微物

理方案, 并将其耦合到GRAPES中尺度数值模式中, 形成业务化的人工增雨云系模式系统^[64]。随后中国气象局人影中心利用CAMS云方案与GRAPES耦合, 形成了GRAPES-CAMS模式。模式自2007年以来一直自动化运行^[29, 63]。模式以T213资料为初始场, 采用15km分辨率的一套网格。模式每天提供36h预报时效的人工影响天气微物理量场和降水预报。模拟结果结合中央气象台的降水预报, 分析和预报具有人工影响天气催化潜力的区域和时段。模式能较好地预报云的微物理量场和天气形势场, 可作为云系人工增雨条件决策的重要参考依据^[95]。

GRAPES业务模式产品与MM5模式业务产品一起, 服务于全国日常的人工增雨作业及重大社会活动保障。近年来也开展了ARJ飞机积冰试验保障工作(图3)。

5 讨论和建议

本文介绍了人工影响天气中广泛使用的云模式及其在人工影响天气中的应用。一系列人工增雨、人工

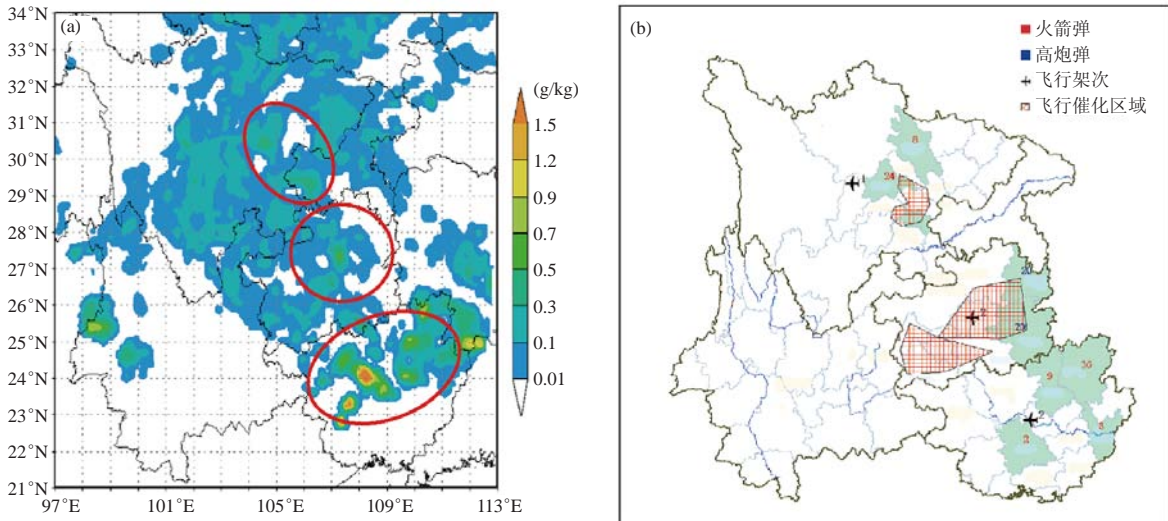


图2 2010年4月6日08时—4月7日08时西南干旱区模式预报过冷云水及催化潜力区和外场增雨区的分布：(a) 阴影为模式预报过冷云水的分布，红圈表示预报的增雨潜力区；(b) 外场作业区域分布，图中的红色数字为使用的火箭弹量，蓝色数字为高炮弹量，黑色数字为飞行架次，红色方格区位飞机催化区域，绿色为火箭和高炮催化区域

Fig. 2 Distributions of model-forecasted supercooled water, seedability regions and field operation activities in southwestern China during the period from 2010-04-06 08:00 to 2010-04-07 08:00. (a) Shadows denote the simulated supercooled water; red circles indicate seedability regions; (b) Locations of field operation carried. Red numbers: rockets; blue numbers: anti-gun shells; black numbers: flights; red hatching: flight-seeded areas; green shaded: rocket- and shell-seeded areas

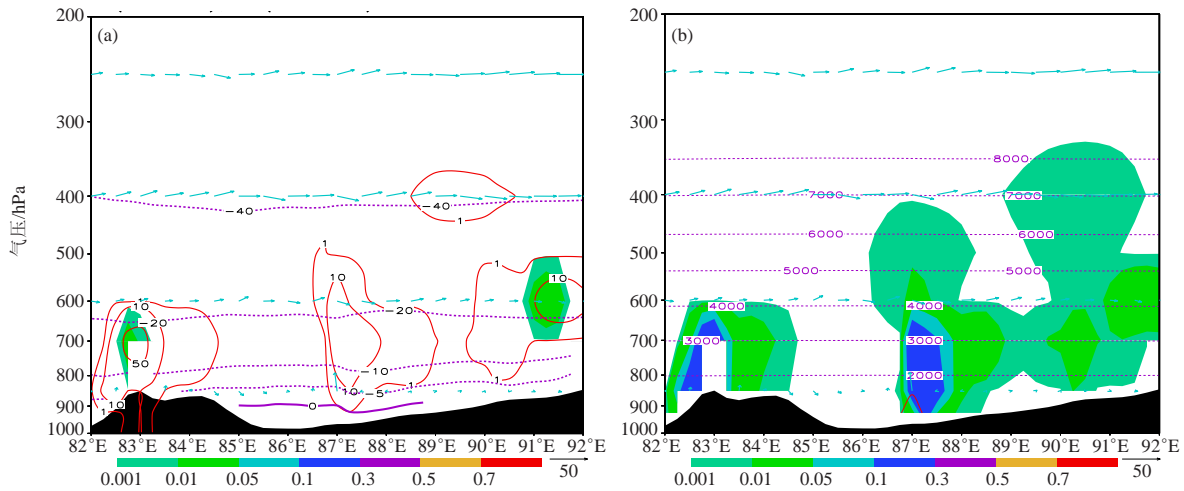


图3 2013年11月8日14时沿46.0°N水成物垂直剖面

(a) 云水 (填色阴影), 冰晶数浓度 (红色等值线), 等温线 (紫色等值线); (b) 雪+霰 (填色阴影), 雨 (红色等值线), 等高线 (紫色等值线)

Fig. 3 Vertical sections of water substances along 46.0°N at 14:00 on November 8, 2013

(a) The ice particle number concentration (L⁻¹) is shown in red lines, the cloud water (g/kg) in color shading. Temperature in purple lines. (b) The rain water content (g/kg) is shown in red lines, the snow and graupel content (g/kg) in colored shading. The heights in purple lines.

防雹、人工消雾和人工消减雨方法，在人工影响天气外场中得到了应用，并在人工影响天气外场业务作业中发挥了重要作用。

尽管几十年来云模式有了很大的发展，但云降水和人工影响天气催化模式的发展还面临着许多科学问

题，包括云降水物理过程理论的进一步理解、模式初始场的资料同化、模拟结果的验证等。未来的重点应当将云模式与室内试验、精心设计的外场观测试验结合，在云物理过程、云降水预报、催化作业技术和催化效果等方面进一步深入研究，提高云模式处理云和

降水物理过程的能力。

参考文献

- [1] Malkus J S, Witt G. The evolution of a convective element: a numerical calculation. *The Atmosphere and the Sea in Motion*. New York: Rockefeller Institution Press, 1959.
- [2] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [3] Cotton W R. Testing, implementation, and evolution of seeding concepts—A review. *Meteorological Monographs*, 1986, 21: 139-150.
- [4] Bruintjes R T. A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 80: 805-820.
- [5] 美国国家科学院国家研究理事会, 美国人工影响天气研究和作业现状与未来发展专业委员会. 郑国光等, 译. 人工影响天气研究中的关键问题. 北京: 气象出版社, 2005.
- [6] Orville H D. A review of cloud modeling in weather modification. *Bull Amer Meteor Soc*, 1996, 77: 1535-1555.
- [7] 郑国光, 郭学良. 人工影响天气科学技术现状及发展趋势. *中国工程科学*, 2012, 14(9): 20-27.
- [8] 毛节泰, 郑国光. 对人工影响天气若干问题的探讨. *应用气象学报*, 2006, 17(5): 643-646.
- [9] 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展. *大气科学*, 2008, 32(4): 967-974.
- [10] 洪延超, 雷恒池. 云降水物理和人工影响天气研究进展和思考. *气候与环境研究*, 2012, 17(6): 951-967.
- [11] 郭学良, 付丹红, 胡朝霞. 云降水物理与人工影响天气研究进展 (2008—2012年). *大气科学*, 2013, 37(2): 351-363.
- [12] Steiner J T. A three-dimensional model of cumulus cloud development. *J Atmos Sci*, 1973, 30: 414-435.
- [13] Klemp J B, Wilhelmson R B. The storm dynamics. *J Atmos Sci*, 1978, 35: 1070-1196.
- [14] Cotton W R, Stephens M A, Neherkorn T. The Colorado State University three-dimensional cloud/mesoscale model - 1982. Part II: An ice phase parameterization. *J de Rech Atmos*, 1982, 16: 295-320.
- [15] 王谦, 胡志晋. 三维弹性大气模式和实测强风暴的模拟. *气象学报*, 1990, 48(1): 91-101.
- [16] 许焕斌, 王思薇. 三维可压缩大气中的云尺度模式. *气象学报*, 1990, 48(1): 80-90.
- [17] 孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 对流云中冰相过程的三维数值预报 (I), 模式建立及冷云参数化. *大气科学*, 1990, 14(4): 441-453.
- [18] Wisner C, Orville H D, Myers C. A numerical simulation of hail bearing cloud. *J Atmos Sci*, 1972, 29(6): 1160-1181.
- [19] 胡志晋, 蔡利栋. 积云暖雨过程及其盐粉催化的参数化数值模拟. *大气科学*, 1979, 3(4): 334-342.
- [20] 胡志晋, 严采繁. 层状云微物理过程的数值模拟 (一) 微物理模式. *中国气象科学研究院院刊*, 1986, 1(1): 37-52.
- [21] 胡志晋, 何观芳. 积雨云微物理过程的数值模拟: (一) 微物理模式. *气象学报*, 1987, 45(4): 467-484.
- [22] Milbrandt J A, Yau M K. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II: A proposed three-moment closure and scheme description. *J Atmos Sci*, 2005, 62: 3065-3081.
- [23] Tao W K, Simpson J. The Goddard cumulus ensemble model, Part I: Model description. *Terrestrial. Atmos Ocean Sci*, 1993, 4: 19 - 54.
- [24] Li X, Tao W-K, Khain A P, et al. Sensitivity of a cloud-resolving model to bulk and explicit bin microphysical schemes. Part I: Comparisons. *J Atmos Sci*, 2009, 66: 3-21.
- [25] Tripoli G J, Cotton W R. The Colorado State University three-dimensional cloud mesoscale model -Part I: General theoretical framework and sensitivity experiments. *J Rech Atmos*, 1982, 16: 185-220.
- [26] Van den Heever S C, Carrió G G, Cotton W R, et al. Impacts of nucleating aerosol on Florida storms. Part I: Mesoscale simulations. *J Atmos Sci*, 2006, 63: 1752-1775.
- [27] 刘玉宝, 周秀骥, 胡志晋. 三维弹性套网格中尺度 ($\beta - \gamma$) 大气模式. *气象学报*, 1993, 51(3): 369-380.
- [28] 楼小凤. MM5模式的新显式云物理方案的建立和耦合及原微物理方案的对比分析. 北京: 北京大学, 2002.
- [29] Lou X F, Shi Y Q, Sun J, et al. Cloud-resolving model for weather modification in China. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 1055-1061.
- [30] 刘卫国. ARPS中尺度模式双参数冰雹云微物理方案发展和研究. *中国气象科学研究院年报*. 北京: 中国气象科学研究院, 2011.
- [31] 肖辉, 徐华英, 黄美元. 积云中云滴群形成的数值模拟研究: (一) 盐核谱和浓度的作用. *大气科学*, 1988, 12(2): 121-130.
- [32] 洪延超. 积层混合云数值模拟研究 (I) - 模式及微物理过程参数化. *气象学报*, 1996, 54(5): 544-557.
- [33] 郭学良, 黄美元, 徐华英, 等. 层状云的雨滴谱分档数值模拟研究. *大气科学*, 1998, 23(4): 411-421.
- [34] 郭学良, 黄美元, 洪延超, 等. 三维冰雹分档强对流云数值模拟研究. *大气科学*, 2001, 25(5): 707-719.
- [35] 许焕斌, 王思薇. 二维冰雹云模式研究. *气象学报*, 1988, 46(2): 227-236.
- [36] Yin Y, Levin Z, Reisn T Z, et al. Seeding convective clouds with hygroscopic flares: Numerical simulations using a cloud model with detailed microphysics. *J Appl Meteorol*, 2000, 39(9): 1460-1472.
- [37] 黄燕, 徐华英. 播撒碘化银粒子进行人工防雹的数值试验. *大气科学*, 1994, 18(5): 612-622.
- [38] Meyers P M, DeMott P J, Cotton W R. A comparison of seeded and nonseeded orographic cloud simulations with an explicit cloud model. *J Appl Meteor*, 1995, 34: 834-846.
- [39] DeMott P J. Quantitative descriptions of ice formation mechanisms of silver iodide - type aerosols. *Atmos Res*, 1995, 38: 63-99.
- [40] 刘诗军, 胡志晋, 游来光. 碘化银核化过程的数值研究. *气象学报*, 2005, 63(1): 30-40.
- [41] 杨洁帆, 雷恒池. AgI焰剂对层状云催化的数值模拟. *气候与环境研究*, 2010, 15(6): 705-717.
- [42] Curic M, Janc D, Vuckovic V. Cloud seeding impact on precipitation as revealed by cloud-resolving mesoscale model. *Meteoro Atmos Phys*, 2007, 95(3): 179-193.
- [43] 刘卫国, 史月琴, 党娟. 双参数混合相微物理方案及冷云催化在ARPS模式中的应用. 第26届中国气象学会年会气象学会人工影响天气与大气物理学分会论文集. 2009.
- [44] 李兴宇, 洪延超. 三维冰雹云数值催化模式改进与个例模拟研究. *气象学报*, 2005, 63: 874-888.
- [45] 方春刚, 郭学良, 王益兴. 碘化银播撒对云和降水影响的中尺度数值模拟研究. *大气科学*, 2009, 33(3): 621-633.
- [46] 何晖, 高茜, 李宏宇. 北京层状云人工增雨数值模拟试验和机理研究. *大气科学*, 2013, 37(4): 905-922.
- [47] Xue L, Hashimoto A, Murakami M. Implementation of a silver iodide cloud seeding parameterization in WRF. Part I: Model description and idealized 2D sensitivity tests. *J Appl Meteor Climatol*, 2013, 52: 1433-1457.
- [48] Xue L, Tessendorf S, Rasmussen R, et al. Implementation of a silver iodide cloud seeding parameterization in WRF. Part II: 3D simulations of actual seeding events and sensitivity tests. *J Appl Meteor Climatol*, 2013, 52(6): 1458-1476.
- [49] 楼小凤, 何观芳, 胡志晋, 等. 三维对流云盐粉催化模式的发展和催化模拟试验. *高原气象*, 2013, 32(2): 491-500.
- [50] 徐华英, 郝京甫. 盐粉催化积云降水的数值模拟. *大气科学*, 1983, 7(4): 403-410.
- [51] Segal Y, Khain A, Pinsky M, et al. Effects of hygroscopic seeding on raindrop formation as seen from simulations using a 2000-bin spectral cloud parcel model. *Atmos Res*, 2004, 71: 3-34.
- [52] Kopp F J, Orville H D, et al. Numerical simulation of dry ice cloud seeding experiments. *J Appl Meteor Climatol*, 1983, 22: 1542-1556.
- [53] Fukuta N. Project mountain valley sunshine-progress in science and technology. *Applied Meteor*, 1996, 35: 1483-1493.
- [54] 肖明静, 郭学良, 肖稳安. 碘化银、液态CO₂播撒对流云防雹增雨的数值模拟. *南京气象学院学报*, 2006, 29(1): 768-775.
- [55] 何晖, 郭学良, 李宏宇, 等. 人工消除冷雾的个例模拟分析. *大气科学*, 2011, 35(2): 272-286.
- [56] 郭学良. 大气物理与人工影响天气. 北京: 气象出版社, 2009.

- [57] Simpson J, Wiggert V. 1968 Florida cumulus seeding experiment: Numerical model results. *Mon Wea Rev*, 1971, 99: 87-118.
- [58] Tzivion S, Reisin S, Levin Z. Numerical simulation of hygroscopic seeding in convective clouds. *J Appl Meteor*, 1994, 33: 252-67.
- [59] Young K C. *Microphysical processes in clouds*. Oxford University Press, 1993.
- [60] Lynn B H, Khain A P, Dudhia J, et al. Spectral (bin) microphysics coupled with a mesoscale model (MM5). Part I: Model description and first results. *Monthly weather review*, 2005, 133: 44-58.
- [61] Xue L, Teller A, Rasmussen R, et al. Effects of Aerosol Solubility and Regeneration on Warm-phase Orographic Clouds 568 and Precipitation Simulated by a Detailed Bin Microphysical Scheme. *J Atmos Sci*, 2010, 67: 3336 - 3354.
- [62] 刘奇俊, 胡志晋, 周秀骥. HLAFS 显式云降水方案及其对暴雨和云的模拟(I)云降水显式方案. *应用气象学报*, 2003, 14 (增刊): 60-67.
- [63] 孙晶, 楼小凤, 胡志晋, 等. CAMS复杂云微物理方案与GRAPES模式耦合的数值试验. *应用气象学报*, 2008, 19(3): 315-325.
- [64] 章建成, 刘奇俊. GRAPES模式不同云物理方案对短期气候模拟的影响. *气象*, 2006, 32(7): 3-12.
- [65] 高文华, 赵凤生, 胡志晋, 等. CAMS云微物理方案的改进及与WRF模式耦合的个例研究. *地球物理学报*, 2012, 55(2): 396-405.
- [66] 洪延超, 李宏宇. 一次锋面层状云云系结构、降水机制及人工增雨条件研究. *高原气象*, 2011, 30(5): 1308-1323.
- [67] 高茜, 王广河, 史月琴. 华北层状云系人工增雨两个例数值研究. *气象*, 2011, 37(1): 1241-1251.
- [68] 孙晶, 楼小凤, 史月琴. 祁连山冬季降雪个例模拟分析(II):人工催化试验. *高原气象*, 2009, 28(3): 496-506.
- [69] 史月琴, 楼小凤, 邓雪娇, 等. 华南冷锋云系的人工引晶催化数值试验. *大气科学*, 2008, 32(6): 1256-1275.
- [70] 王斌, 向玉春, 张鸿雁. 一次对流降水过程增雨催化时机的模拟分析和雷达识别. *气象*, 2008, 34(1): 35-40.
- [71] 房文, 郑国光, 何观芳. 青海秋季对流云降水及催化过程数值模拟研究. *南京气象学院学报*, 2005, 28(6): 763-769.
- [72] 孙海燕, 肖辉, 王振会. 对流性云火箭增雨试验效果的数值模式评估. *南京气象学院学报*, 2005, 28(2): 172-179.
- [73] 陈小敏, 刘奇俊, 章建成. 祁连山云系云微物理结构和人工增雨催化个例模拟研究. *气象*, 2007, 33(7): 33-43.
- [74] Reisin T, Tzivion S, Levin Z. Seeding convective clouds with ice nuclei or hygroscopic particles: A numerical study using a model with detailed microphysics. *J Appl Meteor*, 1996, 35:1416-34.
- [75] Yin Y, Levin Z, Reisin T, et al. On the response of radar-derived properties to hygroscopic flare seeding. *J Appl Meteor*, 2001, 40: 1654-1661.
- [76] Drofa S, Ivanov V N, Rosenfeld D, et al. Studying an effect of salt powder seeding used for precipitation enhancement from convective clouds. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2010, 10(4): 10741-10775.
- [77] 陈宝君. 人工增雨降温机理的数值模拟研究: 对流云个例试验. *气象科学*, 2006, 26(1): 47-52.
- [78] 黄彦彬. 海口市人工催化热带对流云增雨降温的数值模拟. *大气科学学报*, 2010, 33(1): 40-46.
- [79] 何观芳, 胡志晋. 不同云底温度雹云成雹机制及其引晶催化的数值研究. *气象学报*, 1998, 56(1): 31-45.
- [80] 楼小凤, 师宇, 卢广献. 一次降雹过程的AgI系列催化模拟研究. *应用气象学报*, 2016, 27(2): 129-139.
- [81] Farley R D. Numerical modeling of hailstorms and hailstone growth. Part III: Simulation of an Alberta hailstorm—natural and seeded cases. *J Climate Appl Meteor*, 1987, 26: 789-812.
- [82] 胡朝霞, 齐彦斌, 郭学良, 等. 青藏高原东部冰雹形成机理的数值模拟. *气候与环境研究*, 2007, 12(1): 37-48.
- [83] 胡朝霞, 李宏宇, 肖辉, 等. 旬邑冰雹云的数值模拟及累积带特征. *气候与环境研究*, 2008, 8(2): 196-208.
- [84] 康凤琴, 张强, 渠永兴, 等. 青藏高原东北侧冰雹微物理过程模拟研究. *高原气象*, 2004, 23(6): 735-742.
- [85] 周非非, 肖辉, 黄美元, 等. 人工抑制上升气流对冰雹云降水影响的数值试验研究. *南京气象学院学报*, 2005, 28(2): 153-162.
- [86] 巴特尔, 单久涛, 博格. 人工防雹催化效果的数值模拟. *安徽农业科学*, 2013, 41(7): 3038-3040.
- [87] 楼小凤, 孙晶, 史月琴, 等. 减弱对流云降水的AgI催化原理的数值模拟研究. *气象学报*, 2014, 72(4): 782-793.
- [88] 孙晶, 史月琴, 楼小凤, 等. 人工缓减梅雨锋暴雨的数值试验. *大气科学*, 2010, 34(2): 337-350.
- [89] 何晖, 金华, 李宏宇, 等. 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. *气候与环境研究*, 2012, 17(1): 46-58.
- [90] Rosenfeld D, Khain A, Lynn B, et al. Simulation of hurricane response to suppression of warm rain by sub-micron aerosols. *Atmos Chem Phys*, 2007, 7: 3411-3424.
- [91] 赵清云. 播撒盐粉局部消除暖雾的数值模拟. *热带气象*, 1989, 5(3): 245-252.
- [92] Khain A, Arkhipov V, Pinsky M, et al. Rain enhancement and fog elimination by seeding with charged droplets. Part I: Theory and numerical simulations. *J Appl Meteor*, 2004, 43: 1513-1529.
- [93] Liu Y B, et al. Performance and enhancements of the NCAR/ ATEC mesoscale FDDA and forecasting system. 15th Conference on numerical Weather Prediction, San Antonio, Texas, 12-16 August, 2002.
- [94] Lou X F, Breed D. Model evaluations for winter orographic clouds with observations. *China Sci Bull*, 2011, 56: 76-83.
- [95] 马占山, 刘奇俊, 秦琰琰, 等. 利用TRMM卫星资料对人工增雨云系模式云微现场预报能力的检验. *气象学报*, 2009, 67(2): 260-271.