

黄彦彬. 海口市人工催化热带对流云增雨降温的数值模拟 [J]. 大气科学学报, 2010, 33 (1): 40-46

Huang Yan-bin Numerical simulation of AgI seeding in tropical convective cloud for rain enhancement and temperature dropping in Haikou, China [J]. Trans Atmos Sci, 2010, 33 (1): 40-46

海口市人工催化热带对流云增雨降温的数值模拟

黄彦彬

(海南省气象科学研究所, 海南 海口 570203)

摘要: 利用中国科学院大气物理研究所发展的具有火箭人工增雨催化功能的三维云分档数值模式 (AP2HBM), 对 2004 年 7 月 8 日海南岛海口市市区的一次热带对流云火箭人工增雨降温作业过程的宏、微观物理演变过程和人工增雨降温作业效果进行数值模拟。结果显示, 人工催化播撒 AgI 后地面降水增加、地面气温下降的区域扩大、维持时间延长。催化导致云水含水量降低, 雨水、冰晶、霰、雪含量增加, 云中雨水的大量蒸发和冰晶、霰和冰雹粒子融化造成空气温度降低。

关键词: 热带对流云; 人工增雨; 降温; 数值模拟

中图分类号: P426. 61 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097 (2010) 01-0040-07

Numerical Simulation of AgI Seeding in Tropical Convective Cloud for Rain Enhancement and Temperature Dropping in Haikou, China

HUANG Yan-bin

(Hainan Institute of Meteorological Sciences, Haikou 570203, China)

Abstract: Based on the three-dimensional hail-category hailstorm model developed by Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, simulated in this paper are the macro- and micro- physical processes and the effect of artificial rainfall enhancement and temperature dropping in a operation process of AgI seeding in tropical convective cloud in Haikou, China on 8 July 2004. Results show that, after AgI seeding in the tropical convective cloud, the surface precipitation enhancement and temperature dropping last longer with larger area compared with the unseeded process. The cloud water amount is reduced and the rain water, ice crystal, graupel and snow amounts are increased after the artificial AgI seeding. The surface air temperature dropping is mainly induced by the evaporation of rain water and melting of ice crystal, graupel and hail in their falling processes.

Key words: tropical convective cloud; artificial rain enhancement; temperature dropping; numerical simulation

0 引言

近年来, 国内很多城市开始利用人工增雨增加地面降水的方法来降低气温缓解城市高温。江苏、上海、杭州等地先后进行业务化作业试验^[1]。海口市是我国唯一的地处热带的省会城市, 夏季热带对流云较多, 夏季 5—9 月每月平均出现降水的日数达 16 d, 人工增雨作业条件较好^[2]。

云、降水和人工增雨的数值模拟试验方法已广泛地应用于对流云人工增雨作业原理、催化作业机理和作业效果评估中。Farley 等^[3]利用大冰粒子分档混合模式模拟了 Alberta 冰雹计划中的催化引晶个例; Tripoli 和 Cotton^[4]模拟了 Florida 的深厚对流云中各种微物理粒子浓度并与实测结果进行了对比; Johnson 等^[5]利用数值模式对比分析了超级单体风暴降水中加入冰晶微物理过程与没有冰晶微物理过程云的发展演变过程; Khain 等^[6]利用数值模式

收稿日期: 2007-10-08; 改回日期: 2009-01-12

基金项目: 中国气象局新技术推广项目 (CMA TG2008M47); 吉林省人工影响天气开放实验室与中国气象局联合基金 (200701)

作者简介: 黄彦彬 (1967—), 男, 河南荥阳人, 副研究员, 研究方向为人工影响天气及大气物理, hyb6706@tom.com

研究了深厚对流云中动力和微物理过程对降水的贡献。李德俊和陈宝君^[7]、董钢等^[8]、陈宝君等^[9]、王孝波等^[10]利用三维模式分析了微物理过程对强风暴和暴雨的影响机制;肖明静等^[11]模拟了对流云中播撒碘化银、液态 CO₂ 对增雨防雷效果的影响并进行了敏感性模拟试验;孙海燕等^[12]、房文等^[13]、王斌等^[14]利用三维对流云模式模拟了对流云人工增雨机理,分析了作业时机及催化效果等。陈宝君^[1]利用数值模拟方法分析了人工增雨降温机理,认为采用人工增雨的方法可以使降小雨的云系产生更大的降水进而增加地面降温的幅度。总的来说,在人工增雨降温方面的数值模拟研究不多。

本文利用中国科学院大气物理研究所开发的三维云分档数值模式 (AP2HBM)^[15-16]对海口市 2004 年 7 月 8 日人工增雨降温作业进行数值模拟,分析对比人工催化云与没有催化的自然云的微物理变化过程、降水和降温效果,以期对以后此类作业提供参考和理论依据。

1 天气背景与作业过程

1.1 作业背景

2004 年 6 月 23 日—7 月 7 日海南受西南低压槽的影响出现少见的持续高温天气,图 1 为海口市 6 月 23 日—7 月 9 日的日最高温度和平均温度,6 月 23 日—7 月 7 日这段时期最高气温都在 32 以上,日平均气温也多在 25 ,加上连续 10 多天少有降水,造成了持续多日的高温酷暑天气。

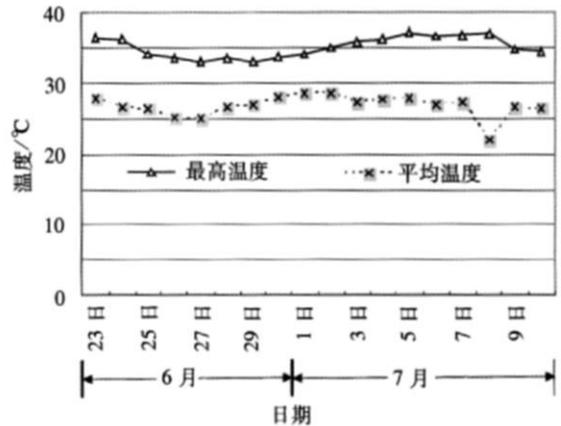


图 1 2004 年 6 月 23 日—7 月 9 日海口市最高温度和日平均温度 ()

Fig 1 The maximum temperature and daily mean temperature in Haikou from 23 June to 7 July 2004 (units)

1.2 天气形势

2004 年 7 月 8 日 08 时,我国江淮流域至中印半岛北部 500 hPa 有一深厚的高空槽不断地向东移动,海南岛受槽前西南气流控制,高空槽在东移过程中略有北收,我国东南沿海地区槽前西南气流明显增大。850 hPa,海南岛位于强大的冷高内部,随着冷高不断东移出海,08 时海南岛位于副高内部西南边缘,受东南气流控制,有利于局地对流活动。

1.3 大气热力特征

图 2 是 2004 年 7 月 08 时海口探空站 T-lnp 图。左边曲线为高空 200~100 hPa 的 T-lnp 图,右边曲

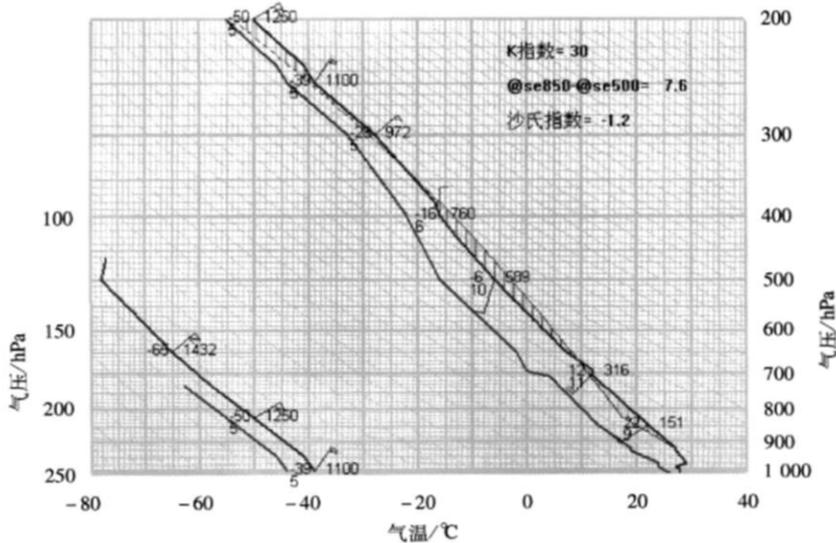


图 2 2004 年 7 月 8 日 08 时海口探空站 T-lnp 图

Fig 2 The T-lnp diagram of sounding station in Haikou at 0800 BST 8 July 2004

线为地面到 200 hPa 的 T - $\ln p$ 图。由图 2 可见,此次对流云天气发生和发展的条件比较有利,低层一致为西南风,风速在 $5 \sim 10 \text{ m/s}$ 左右,400 ~ 500 hPa 之间有一风向的切变,由西南风顺转为东北风,此时大气层结表现为明显的不稳定状态,非常有利于对流的发生发展。17 时海口地面站气温为 33.8 ,为对流发展提供了非常有利的热力条件;在 850 hPa 高度层,风速达到 10 m/s ,且风速随高度逐渐增大,这样在 600 hPa 以下,就非常有利于暖湿空气的输送;在 150 hPa 和 250 hPa 处,风速达到极大值,约为 32 m/s 。

1.4 作业过程及效果

7 月 8 日 16 时 46 分,位于海南省南部的三亚 713 气象雷达站探测到临近海口西南部一带有一块状对流云发展并向海口市移动,图 3 为 16 时 46 分和 16 时 48 分测得的 PPI(仰角 1.7°) 和 RHI(方位: 17.5°),分析图 3 可以看出,该对流云系水平尺度约 30 km 左右,云顶最大高度为 15.8 km ,回波最大强度 40 dBZ 。17 时 10 左右,该云系逐步逼向海口市区,十分有利于实施人工增雨作业,海南省气象局人工增雨作业指挥中心迅速调集火箭作业车赶到海口市区西南的永庄,迎面对该对流云进行作业,于 17 时 19 分用 65° 仰角向该云实施作业,供耗弹 4 枚。根据现场观测,作业后海口市区降水持续了 1 h 左右,市区 5 个雨量站点中测得最大降水 49.0 mm ,最小的也有 19.5 mm 。作业后 19 时海口地面观测最低气温为 24.4 ,与作业前 17 h 地面气温 33.8 相比下降 9.4 。1—7 日海口 17 时到 19 时降温幅度平均为 2.2 ,最高的为 7 日的 3.9 ,4—6 日只有 1.6 ,达到了增加降水和降温消暑的目的。

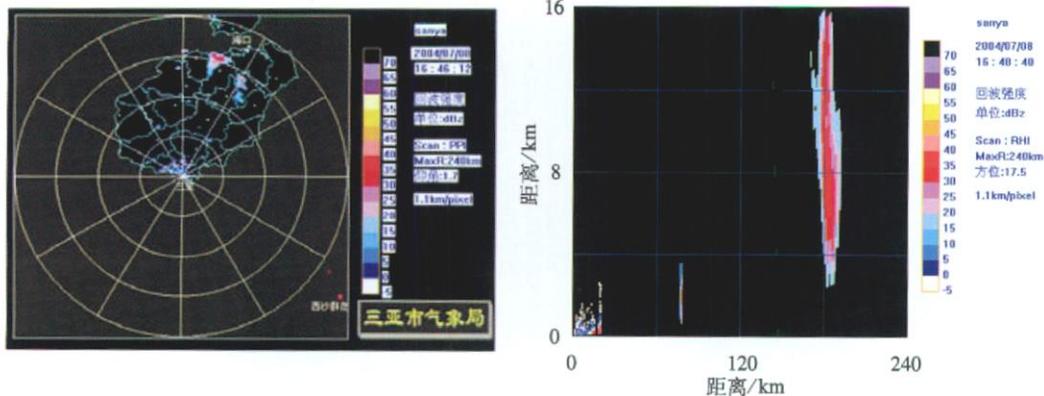


图 3 2004 年 7 月 8 日三亚雷达站观测的 PPI(仰角: 1.7°) 和 RHI(方位角: 17.5°)

Fig 3 PPI(elevation angle: 1.7°) and RHI(azimuth angle: 17.5°) observed at Sanya Radar station, 8 July 2004

2 人工增雨消暑过程的数值模拟

2.1 云数值模式描述

2.1.1 云数值模式及催化过程介绍

利用中国科学院大气物理研究所具有火箭人工催化 AgI 功能的 3 维强风暴冰雹分档模式 (AP2HBM) 对该次对流云降水过程及其作业过程进行了数值模拟,本模式为三维时变完全弹性非静力积层混合云人工消暑增雨模式,包含火箭 AgI 催化过程。此模式的动力学框架是一组时变、非静力平衡、可压缩的完全弹性方程组,模式控制方程及所包含的播撒过程,对云、雨滴的收集方式见文献 [15],播撒剂与云的作用包括接触核化和凝华核化两种,水面饱和下,活化催化剂的凝华核化率见文献 [10],对接触核化主要考虑碰并和布朗收集。差分格式和边界条件同文献 [15-16]。

2.1.2 模式资料及前期处理

模式采用的探空资料是海口 (59758 站) 08 时的常规资料,并利用海口站 17 时的地面资料进行了订正。气压层次为地面到 50 hPa 各等压面上的温度、露点、风速、风向,并将风速在水平方向分解为 u 、 v 分量,在垂直方向采用 Lagrange 插值公式,将水平风速插值到相应的垂直网格点上,作为该模式启动的初始环境场。

2.1.3 对流启动方式

模式采用湿热泡扰动方式激发初始对流,选用模拟域随风暴移动技术,使得模拟风暴始终位于模式的中心。模拟域的范围为 $36 \text{ km} \times 36 \text{ km} \times 19 \text{ km}$,网格距 $x = y = 500 \text{ m}$, $z = 500 \text{ m}$,大时步为 5 s ,小时步为 0.125 s ,积分时间为 80 min 。最大扰动位温 1.0 K ,扰动中心格点坐标 (18, 18, 4),扰动

半径 10 km,厚度 4 km。

2.1.4 AgI 催化方式

冰雹形成前期或者初期,在主上升气流区进行大剂量播撒碘化银增雨和减雹效果最好^[12]。选择模式催化开始时间取 8 min,水平范围以格点坐标 (18, 18) 为中心、半径取 1.2 km,催化高度为 4.8 ~ 6.0 km,共播撒 AgI 42 g,这与实际播撒剂量相同。

2.2 模拟结果

模式模拟了这次对流过程自然云的一些主要特性量,之后按照实际作业情况根据 BL-1 型火箭的 AgI 的核化率及相应发射参数进行人工催化试验。

表 1 是作业影响区实测资料与模拟的自然云、催化云的结果对比。位于海口市南部 200 km 左右的三亚雷达站从 16 时 42 分发现初始回波 (大于 20 dBZ), 17 时 50 分该对流云消散,历时 84 min;模拟的没有催化的自然云从 8 min 开始出现初始回波到 66 min 云消散,模拟的自然云的生命史比实测结果少 18 min,回波的移动方向也与观测结果符合。从降水催化结果来看,用作业前的雷达回波与模拟云降水前的雷达回波进行对比,模拟云与实测云的最大回波强度均为 40 dBZ,但回波区的水平尺度、云顶高度比实测结果略低。模拟的自然云最大降水量为 35 mm,催化云为 59 mm,比自然云增加 24 mm,相对增加 68.6%。模拟的自然云地面最低温度从 32 下降到 27,下降幅度为 5,而催化云下降到 22,下降幅度大约 10,催化云最大降温幅度比自然云低 5。

海口市市区共有 5 个自动雨量站,最大雨量点过程降水量 49 mm,海口地面站过程降水量 37 mm;地面气温从 17 时的 33.8 下降到 19 时的 24.4,降温幅度 9.4,实际降温效果明显。

2.3 人工催化后宏、微物理过程对比

2.3.1 微物理量云时空分布特征对比

从云水 (g/kg)、雨水 (g/kg)、冰晶数浓度 (L⁻¹)、霰雹含量 (g/kg) 在 x-z 剖面上 (y = 20 km)

表 1 实测资料与模拟的自然云及催化云结果对比

Table 1 Result comparison of observed cloud with simulated unseeded and seeded clouds

	云生命史 / min	雷达回波顶 高度 /km	回波水平 尺度 /km	雷达回波 强度 /dBZ	回波移动方向	最大上升 气流 / (m · s ⁻¹)	地面最大 降水 /mm	总降水量 / kt
实测	84	15.8	35	40	西南—东北		49	
模拟自然云	66	13.8	32	40	西南—东北	23.5	35	1338.7
模拟催化云	70	13.8	33	42	西南—东北	23.5	59	3192.3

的分布 (图略) 可知。没有催化的自然云 14 min 时 x-z 剖面上的云水含量 (g/kg) 分布,与人工催化后的云相比,播撒 6 min 后云的云水含量明显减少,云上部的 7 ~ 9 km 区域播撒后最大值从 1.6 g/kg 降低到 0.6 g/kg,尤其是 7 ~ 9 km 云水含量最大值为 1.6 g/kg,说明播撒引起了过冷水的大量消耗。

22 min 催化云的雨水含量与范围都相应比自然云略大; 20 min 时播撒后的云上部冰晶数浓度和范围比自然云都有所增加和扩大;催化云中霰雹含量的增加最为明显,与自然云相比明显增大, 26 min 催化云霰雹最大含量大于 3.50 g/kg,而自然云只有 0.35 g/kg,相比增大 10 倍以上,霰雹粒子的下落导致地面降水的增加,而在下降过程中环境温度较高使得霰雹粒子不断融化促使地面气温下降,催化云中霰雹粒子经过的 20 等温线附近区域明显向下弯曲,而自然云则不明显。

2.3.2 云中各物理量随时间演变

图 4a 给出了云中最大上升气流速度 W_{max} 随时间的演变。20 min 以前自然云与催化云的云中最大上升气流速度没有明显的区别, 18 min 自然云和催化云最大上升气流速度达到最强,之后随时间开始减弱。21 min 以后催化云中最大上升气流速度减弱的幅度明显比自然云低,播撒在云中产生了一定的动力效应, 40 min 时差异最大,达到 2.19 m/s。

图 4b 为云中最大云水含量 Q_c 随时间的演变。10 min 时自然云和催化云中最大云水含量 Q_c 达到最大 3.18 g/kg, 18 min 后两者存在明显的差异,催化云随着播撒剂核化并与过冷云水作用,云水含量比自然云迅速减少, 22 min 两者之间的差异达到最大值 0.7 g/kg。

图 4c 给出了各种云中最大雨水含量 Q_r 随时间的分布。与自然云相比, 20 min 前雨水最大含水量基本相同, 20 min 以后由于大量冰晶碰冻过冷雨水生成霰,另一方面雪的大量增加和凝华增长,而后落入过冷雨区,雪消耗过冷雨水形成冻滴。28 min 后,

催化云的雨水最大含量达到 13.2 g/kg,两者之间的差异达到 5.4 g/kg.

图 4d给出了各种云中最大雪比含水量 Q_s 随时间的分布。冰晶撞冻过冷水产生雪晶,雪收集过冷水凝华增长。18 min后催化云雪水最大含量达 1.2 g/kg,自然云只有 0.1 g/kg,18~58 min催化云与自然云之间最大雪含量一直存在较大差异,58 min后两者差异很小。

图 4e为自然云和催化云中霰含水量 Q_g 随时间的分布。由于人工冰核和云雨滴之间接触冻结核化,24 min时霰的最大含水量从 2.3 g/kg增大到 9.4 g/kg,增幅达 309%。

图 4f给出了各种云中最大冰雹含水量 Q_h 随时间的分布。播撒使产生冰雹时间推后,而且冰雹含量有不同程度的减小。20 min时,自然云和催化云的最大冰雹含水量均为 1.0 g/kg,之后自然云继续快速增加,而催化云则开始下降,24 min时催化云冰雹最大含水量只有 0.8 g/kg,而自然云为 1.3 g/kg,24 min后催化云最大冰雹含量比自然云低。

图 4g为催化云和自然云中冰晶最大数浓度随时间的变化,12 min开始催化云的冰晶最大数浓度开始快速增加,16 min达到极值 $598 L^{-1}$,之后缓慢下降;而自然云 12 min开始缓慢上升,28 min冰晶的数浓度达到极值 $532 L^{-1}$,期间多有起伏。

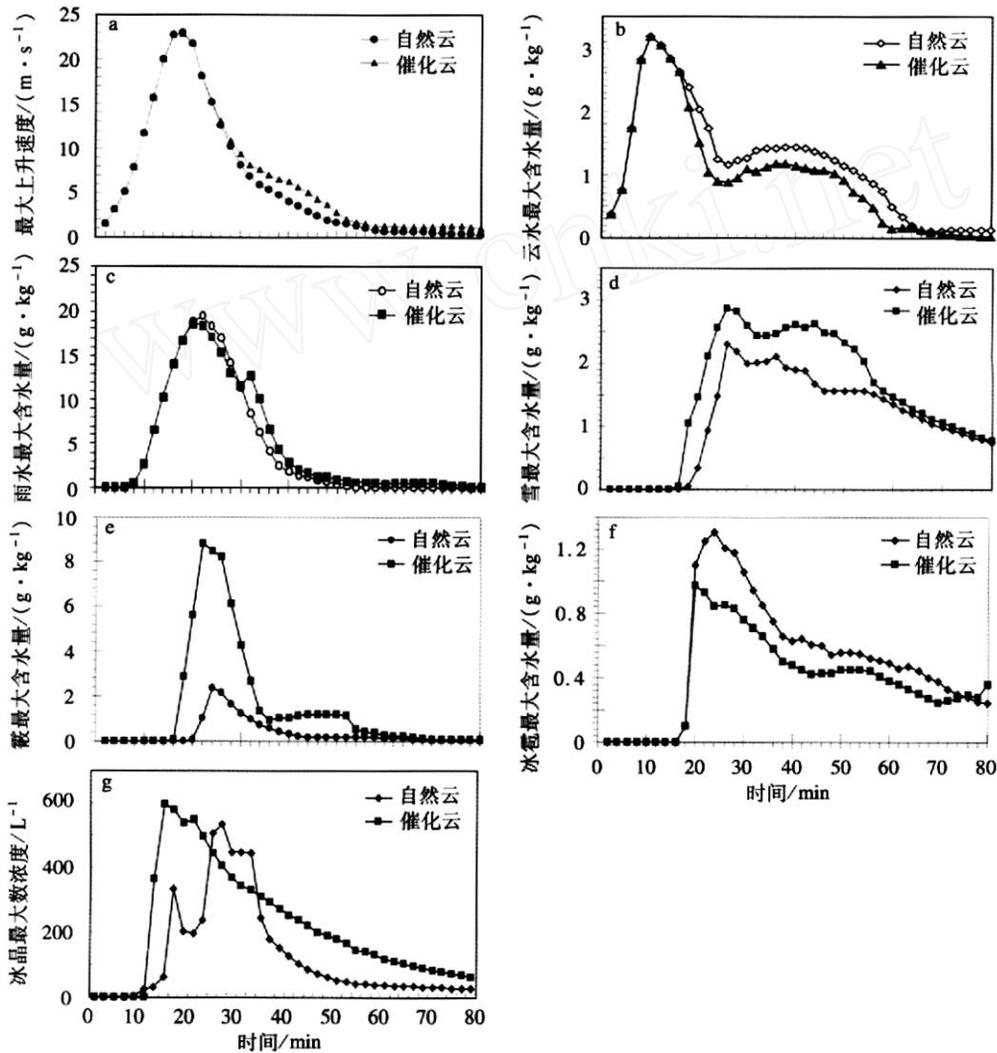


图 4 云中各物理量随时间分布 a 云中最大上升气流速度 (m/s); b 云水最大含水量 (g/kg); c 雨水最大含水量 (g/kg); d 雪最大含水量 (g/kg); e 霰最大含水量 (g/kg); f 冰雹最大含水量 (g/kg); g 冰晶最大数浓度 (L^{-1})

Fig 4 Temporal evolution of physical quantities in clouds a maximum updraft velocity(m/s); b maximum cloud water content (g/kg); c maximum rain water content(g/kg); d maximum snow content(g/kg); e maximum graupel content(g/kg); f maximum hail content(g/kg); g maximum ice crystal number concentration(L^{-1})

综上所述,人工催化播撒 AgI后使云水含量降低,而云中雨水、冰晶、雪、霰含量增加,冰晶的增幅最为明显,其次是霰的增长。由于雨水的蒸发和冰晶、霰、冰雹、雪花粒子在下落过程中的融化共同促使云内的温度降低,进而使得地面气温也下降。

2.4 增雨和降温过程分析

图 5a为地面累积降水总量和云中雨水的蒸发总量随时间的演变情况,从模拟的自然云来看,从 12 min开始降水,之后地面降水快速增多,38 min后转为小雨,42 min之后不再增加。催化云 14 min也开始出现降水,26 min以前与自然云相比地面累积降水总量没有明显的差异;26 min以后由于催化后播入的 AgI催化剂核化作用的影响,催化云累积地面降水总量与自然云相比迅速跃增,38 min以后增速变缓,因此这次人工增雨作业催化后增雨效果主要在 30~38 min产生,增加的降水超过 100%,在 80 min模拟段内地面累积降水总量从没有催化的自然云的 1 338.7 kt增大到 3 192.3 kt,催化后增雨效果达到 138.5%,增雨效果明显。24 min前对比云和催化云的蒸发总量基本相同,呈缓慢增加的趋势,24min后催化云蒸发总量快速增加,一直到 42 min

增加到 3 664 kt之后才基本不再增加;对比云 24 min后蒸发量也显著增大,但明显没有催化云变化剧烈,50 min后达到极值 1 270 kt后停止增加。催化后云中雨水的蒸发量远较对比云大,蒸发总量对比云多 188%,增速也更快,云中雨水的大量蒸发吸收近地面热量导致地面气温迅速降低,是地面降温的主要因素。

图 5b为云中霰雹总量随时间的变化,可以看出催化云与对比云霰雹总量的变化与蒸发量的变化趋势基本一致,催化云霰雹总量最高为 117.3 kt,而对比云中霰雹总量只有 6.6 kt,霰雹在云中降落过程中融化也是导致近地面降温的因素之一。

2.5 地面降水效果

海口市有 5 个雨量站,降水最大的站点 49.0 mm。从模拟的结果来看,自然云最大降水为 35.8 mm,催化云为 58 mm,可见模拟的结果与实测云差别不大,从催化作业的实效来看,人工催化后大幅度增加了地面降水,取得了较好的作业催化效果。

2.6 地面降温消暑结果

图 6a-d 为 32 min和 40 min人工催化后催化云与自然云的地面气温分布情况。对比图 6a自然云和图 6b催化云 32 min时地面气温分布情况可以看到,催化云地面气温最低为 23,自然云为 25,催化云比自然云降温幅度大 2,最低温区面积基本一致;对比 40 min两者之间的差异,催化云地面气温最低已达 21,自然云为 24,两者相差 3,另外模拟自然云西部由于降水结束已开始升温,而催化云 24 以下的低温区域大约 400 km²,远比自然云低温区域大,相应低温维持的时间也更长。

3 结论

(1)通过数值模拟这次作业个例发现,这次作业人工催化时机和作业方式得当,火箭作业后地面降水大幅增加,地面最大降温幅度达 5,降水后期低温区域明显扩大,低温维持的时间更长。因此,通过人工催化的手段可以促使对流云地面降水量的增加和加速地面气温下降的幅度,地面低温区的区域面积扩大。

(2)对比分析了人工催化云与自然云的微物理过程,人工催化后导致云中云水含量降低,雨水、冰晶、霰增加,大量雨水在下降过程中蒸发促使地面气温降低,冰晶和霰的含量剧增使并在下落过程中融化进一步加剧地面气温下降,最终地面降水增加,气温降低。

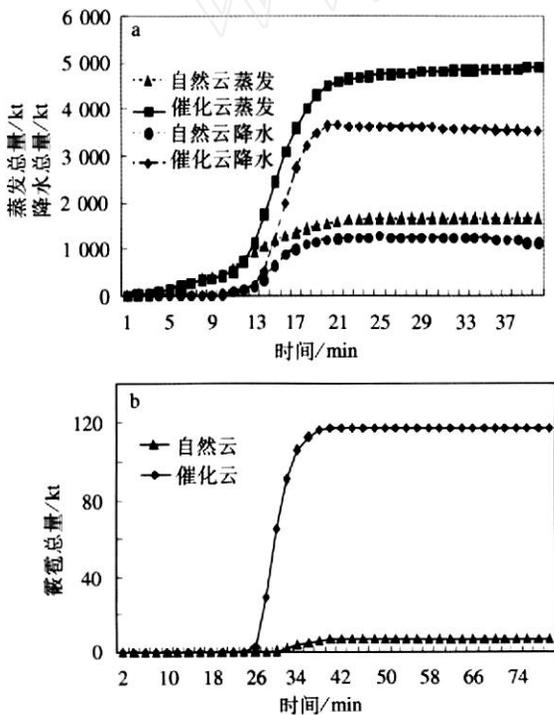


图 5 催化云和自然云的降水、蒸发 (a)以及霰雹 (b)累计总量随时间的演变

Fig 5 Temporal evolution of (a) precipitation and evaporation amounts, and (b) graupel-hail amount in seeded and unseeded clouds(units: kt)

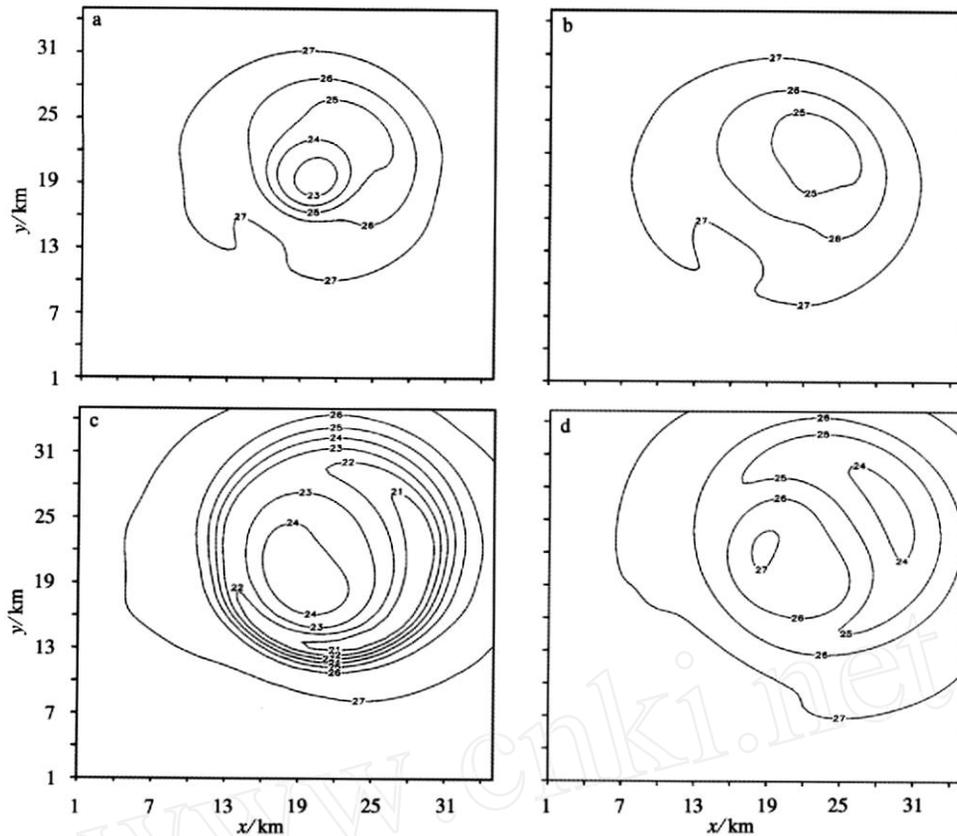


图 6 催化云和自然云的地面气温分布 a 32 m in 催化云; b 32 m in 自然云; c 40 m in 催化云; d 40 m in 自然云

Fig 6 Surface air temperature under the conditions of seeded and unseeded clouds (units: $^{\circ}\text{C}$) a 32 m in seeded; b 32 m in unseeded; c 40 m in seeded; d 40 m in unseeded

参考文献:

- [1] 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 [J]. 气象科学, 2006, 26 (1): 47-52.
- [2] 黄彦彬, 李天富, 邢旭煌. 海南岛空中水汽量与人工增雨潜力分析 [J]. 热带作物学报, 2005, 26 (增刊): 38-41.
- [3] Farley R D, Chen H, Orville H D, et al Numerical simulation of hail formation in the 28 June 1989 Bismarck thunderstorm. Part 1. Cloud seeding results [J]. Atmos Res, 2004, 71: 81-113.
- [4] Tripoli G J, Cotton W R. A numerical investigation of several factors contributing to the observed variable intensity of deep convection over south Florida [J]. J App Meteor, 1980, 19 (9): 1037-1063.
- [5] Johnson D E, Wang P K, Straka J M. Numerical simulations of the 2 August 1981 CCOPE supercell storm with and without ice microphysics [J]. J App Meteor, 1993, 32: 745-759.
- [6] Khain A, Rosenfeld D, Pokrovsky A. Aerosol impact on the dynamics and microphysics of deep convective clouds [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 2005, 131: 1-25.
- [7] 李德俊, 陈宝君. 云微物理过程对强对流风暴的影响之数值模拟研究 [J]. 气象科学, 2008, 28 (3): 561-566.
- [8] 董钢, 吴晓彤, 潘晓滨. 云微物理过程对暴雨影响的数值试验 [J]. 气象科学, 2001, 21 (2): 127-135.
- [9] 陈宝君, 吴海英, 曾明剑. 南京“03.7”大暴雨中云物理过程的数值模拟研究 [J]. 气象科学, 2005, 25 (1): 71-77.
- [10] 王孝波, 肖辉, 杜秉玉. 对流云强降水的数值模拟研究 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25 (5): 656-663.
- [11] 肖明静, 郭学良, 肖稳安. 碘化银、液态 CO_2 播撒对流云防雷增雨的数值模拟 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29 (1): 48-55.
- [12] 孙海燕, 肖辉, 王振会, 等. 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, 2005, 28 (2): 172-179.
- [13] 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 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28 (6): 763-769.
- [14] 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 [J]. 气象, 2008, 34 (1): 35-41.
- [15] 郭学良, 黄美元, 洪延超, 等. 三维冰雹分档强对流云数值模式研究. 模式建立及冰雹的循环增长机制 [J]. 大气科学, 2001, 25 (5): 707-720.
- [16] 郭学良, 黄美元, 洪延超, 等. 三维冰雹分档强对流云数值模式研究. 冰雹粒子的分布特征 [J]. 大气科学, 2001, 25 (6): 856-864.

(责任编辑: 张福颖)