孙晶,史月琴,楼小凤,等. 2010. 人工缓减梅雨锋暴雨的数值试验 [J]. 大气科学, 34 (2): 337-350. Sun Jing, Shi Yueqin, Lou Xiaofeng, et al. 2010. Numerical experiments on artificial seeding of decreasing the Meiyu heavy rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 337-350.

人工缓减梅雨锋暴雨的数值试验

孙晶 史月琴 楼小凤 胡志晋

中国气象科学研究院,北京 100081

摘 要本文利用耦合了中国气象科学研究院双参数微物理方案的中尺度数值模式 MM5,对 2002 年 7 月 22~23 日长江中游一次梅雨锋暴雨过程进行了人工缓减暴雨的冷云催化数值试验。在对降水云系多尺度结构进行正确模拟的基础上,采用增加人工冰晶的催化方法,对人工缓减暴雨的可能方法及原理进行研究。结果表明,不同催化方案得到比较稳定一致的结果,在云体成熟期大剂量持续催化的减雨效果最好,在 3600 km² 内减少雨量 8.29×10⁶ t,即为自然雨量的 14.8%,雨量分布更为均匀,其中 50 mm 以上降水范围由原来的 190 km² 缩减到 60 km²。分析表明,催化增加的大量冰晶碰并过冷雨,使霰粒子浓度增大而平均尺度减小,导致霰落速减弱而小于上升运动,难于下落融化,造成雨水减小。在周围升速小的弱雨区,滞留的霰粒长大后仍能下落融化,引起地面少量增雨。本文所用催化方法在实际作业中具有技术可行性,并有重大潜在社会和经济效益,值得深入研究和试验。

关键词 梅雨锋暴雨 人工减雨 数值模拟 **文章编号** 1006 - 9895 (2010) 02 - 0337 - 14

Numerical Experiments on Artificial Seeding of Decreasing the Meiyu Heavy Rainfall

中图分类号 P426

文献标识码

A

SUN Jing, SHI Yueqin, LOU Xiaofeng, and HU Zhijin

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract A case of heavy rainfall during the Meiyu period of 22 - 23 July 2002 is simulated using mesoscale model MM5 coupled with the CAMS (Chinese Academy of Meteorological Sciences) microphysical scheme. Numerical experiments of adding ice crystals are conducted to study if there is any possibility to decrease the heavy rainfall. Several tests for different seeding times and different concentrations of seeding particles are designed. Results show that overseeding in the mature stage results in the most reduction of rainfall. In the region of 3600 km², rainfall is decreased by 14.8%, which is 8.29×10^6 t. The heavy rainfall area with precipitation over 50 mm decreases from 190 km² to 60 km². After seeding with a large amount of ice crystals, graupel grows through the collection of ice crystal with supercooled rain water. This causes that the number concentration of graupel becomes larger and the mean diameter of graupel becomes smaller. The falling speed of graupel becomes smaller than the updraft and graupel cannot fall to the warm region to melt. This is one of the main reasons of decreasing surface rainfall. While in the weak updraft region around the decreasing rainfall center, graupel retained in the cold area grows gradually, and then falls, which increases the rainfall in the weak precipitation region. The overseeding methods in this paper are able to

收稿日期 2009-04-01, 2009-10-09 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40805003、40305001、40705002,"十一五"国家科技支撑项目 2006BAC12B01

作者简介 孙晶, 女, 1978年出生, 博士, 主要从事云降水物理和人工影响天气研究。E-mail: sunj@cams. cma. gov. cn

be used technically in the practical field test, which is worthy to make further studies and tests. **Key words** Meiyu heavy rainfall, artificial seeding of decreasing rainfall, numerical simulation

1 引言

暴雨洪涝灾害给国民经济和人民生命财产带来 巨大损失,如何防灾减灾则具有重大实际意义。人 工影响天气可以在某种条件下减轻或避免气象灾 害。目前,人工影响天气的主要研究对象是人工增 雨或防雹(毛节泰和郑国光,2006),对人工消雨或 减雨的研究涉及较少。但是,如果在多雨季节或地 区进行人工减雨,特别是人工削弱或抑制局地暴雨 能够减轻洪涝灾害,则是一个值得认真探索的具有 重大潜在社会和经济效益的研究领域(叶家东, 1993; 叶家东等,1998)。

现代人工影响天气开始于 1946 年, Schaefer (1946) 发现在冷云中通过播撒干冰,可以适当增 加云中的冰晶数量,促使降水的形成,指出了人工 增雨作业的基本科学原理。Langmuir (1950) 提出 了"过量播撒"用于人工消云的概念,将较多干冰 撒入云中会产生过多冰核以致形成的雪花超过原来 的水滴,这些雪花并不降落到云外。半个多世纪以 来,随着水资源短缺问题的突显,许多国家都开展 了大规模的人工增雨试验,而人工消云、消雨作业 大多出于重大事件发生时气象保障的需要(李大山 等,2002)。尤其是2008年北京夏季奥运会开幕式 人工消雨试验,引起了国内外的广泛关注。除此以 外,有些增雨试验也出现过反效果的减雨现象 (Dennis and Koscielski, 1969; Dennis and Schock, 1971),如1960~1964年美国对夏季非地形性积云 进行的按试验日随机化设计的"白顶计划"(Braham and Flueck, 1970; Braham, 1986), 统计分析 表明有的播撒区雨量减少,分析其原因发现自然云 冰晶浓度已达到预期的播撒浓度,人工播云形成了 过量播撒而减雨。

除了许多地方开展针对人工消雨的外场试验以 外,有些学者还利用数值模式进行了人工减雨的模 拟研究。Orville et al. (1989)对暖底积云人工催化 模拟试验时,发现播撒大量 AgI 后较早形成的雪和 霰多数被上升气流输送进云砧中,而不能形成有效 的降水。汪学林等(2001)利用二维层状云模式对 吉林地区一次江淮气旋带来的层状云进行增雨催化 模拟时发现,当云发展到 10 min 后,在-8℃层加 入50 L⁻¹冰核,能使云发展加快,地面降水增加 30%左右,如果加入 500 L⁻¹冰核 (过量播撒),反 而使降水减少。何宏让等(1999)利用云模式研究 了初始冰核浓度对冷云对流性降水影响,结果表明 增大初始自然冰核浓度,可使云冰和雪含量增大, 抑制云内雨水和雹的含量,进而削弱地面累积和局 地降水量。尽管在外场试验和数值模拟中取得了一 些结果,但人工消雨的理论和方法还不十分成熟, 特别是针对暴雨过程的研究结果还不多见。以往人 工减雨数值研究主要针对对流云单体,而梅雨锋暴 雨是在天气系统影响下,由几十公里的对流云体组 成上百公里的云带,对这类暴雨过程进行催化数值 研究需要具有多尺度动力框架和详细微物理方案的 中尺度模式。在中尺度范围内对暴雨的催化不是在 外场试验中轻易可以进行的,因而有必要首先利用 先进的数值模式进行催化数值试验,以评估人工催 化改变暴雨强度和时空分布的可能性,研究缓减暴 雨的原理,探索可能的方法。

2002 年 7 月 22~23 日,在我国长江中游地区 出现了一次较强的梅雨锋暴雨过程(赵思雄等, 2004),作者曾利用耦合了中国气象科学研究院双 参数微物理方案的中尺度模式 MM5 对其中尺度对 流系统结构进行了研究(孙晶等,2007),比较成功 地模拟出了与实测资料相近的降水多尺度结构特 征。在该研究基础上,本文对降水云团进行过量播 撒的催化数值试验,重点分析减雨的可能方法和微 物理机制,对人工缓减暴雨可能性进行探索式研究。

2 降水过程简介

2002年7月22~23日,我国长江中游地区梅 雨锋降水过程造成了湖北南部大暴雨天气,观测的 24小时累积雨量最大为148.7 mm,位于荆州附 近。这次过程发生在大气环流经向发展的背景下, 低空中尺度低涡和切变线是强降水的直接影响系 统,850 hPa西南急流向暴雨区输送水汽和热量, 与切变线北侧偏东风气流共同作用,冷暖气流的交 汇为暴雨的形成提供有利条件。孙晶等(2007)利 用耦合了中国气象科学研究院双参数微物理方案的



图 1 2002 年 7 月 22 日 23 时宜昌 (30.7°N, 111.3°E) 多普勒雷达 4 km 高度雷达回波图 (a) 和格距 3.33 km 套网格模拟的 4 km 雷达回 波强度和风场 (b)。粗直线:中尺度对流回波波列

Fig. 1 (a) Reflectivity at the height of 4 km observed by Yichang (30. 7°N, 111. 3°E) radar and (b) reflectivity and wind vector at 4 km simulated in the domain with 3. 33-km grid space at 2300 LST 22 Jul 2002. Thick solid lines represent mesoscale convective echo trains

中尺度数值模式 MM5, 对这次过程进行了高分辨 率的数值模拟, 三重嵌套网格格距分别为 30 km、 10 km、3.33 km,模拟的雨带位置、强度和演变趋 势与实况非常吻合,并且比较成功地模拟出了与实 测雷达资料基本一致的中尺度对流系统结构和演变 特征。实测和模拟的雷达回波结构(图1,图1b范 围和图 1a 基本对应) 共同表明: 低空风切变线南侧 西南气流中不断出现尺度约 30 km 的强回波发生 发展、合并分裂现象,形成沿着切变线分布的尺度 达 500 km 以上的对流回波带;强回波从西南向东 北方向移动,往往构成多个西南一东北走向、尺度 约 200 km 左右的对流回波波列。虽然模式对强回 波具体位置的模拟不可能做到与实测完全对应,但 模拟的雷达回波结构和演变规律得到了与实测一致 的结果。暴雨正是由一个个自西南向东北方向移动 的强回波不断发展引起的。

中国气象科学研究院双参数微物理方案是由楼 小凤(2002)以胡志晋等早期的层状云模式(胡志 晋和严采繁,1986)和对流云模式(胡志晋和何观 芳,1987)为基础发展的一套准隐式格式的混合相 双参数微物理方案,包括了雨水、冰晶、雪和霰等 水成物的比质量和数浓度的预报,考虑了31种云 物理过程,在暴雨模拟和催化数值研究中表现出很 好的能力(史月琴等,2008a,2008b)。因此,在成 功模拟2002年7月22~23日我国长江中游梅雨锋 暴雨的中尺度对流系统结构的基础上,本文继续利 用这一方案进行减雨催化数值试验,探索缓减梅雨 锋暴雨的可能方法,从原理上对改变降水的微物理 机制进行研究。

3 催化试验方案设计

对流云团在不同发展阶段的动力、热力和微物 理结构有所不同,而催化时机的选取对催化效果的 好坏至关重要(方春刚等,2009),为此,需要洗取 一个生命史比较完整的对流回波进行跟踪催化。从 格距 3.33 km 套网格模拟结果可知,图 1b 中的对 流回波 G 从初生到减弱的回波结构比较清晰(图 略),该回波在模拟区域的西南方新生,而后在西 南气流作用下向东北方向移动发展。如图2所示, 22 日 21:00~21:30 (北京时,下同) 为初生阶段, 云体由云水和雨水构成,降水由暖雨过程启动,后 期出现少量过冷水; 22 日 21:30~22:00 为发展阶 段,回波强度超过 50 dBZ,模拟回波顶高超过 10 km, 高空出现冰相粒子, 过冷水含量增加; 22 日 22 时~23 日 00 时为成熟阶段,此时各水成物含 量达到最强; 23 日 00 时之后略减弱并与西面东移 的回波合并。这一回波单体水平尺度较小约 30 km 左右,随着回波G的发展,22日21时至23日00 时造成地面 60 mm 左右的降水。因此,以7月 22 日 21 时至 23 日 00 时的回波 G 为催化对象。

作为原理研究,本文选用在模式选定的时空范 围内人为的增加一定数量的冰晶数浓度和相应的冰 晶比质量方法(Orville,1996)进行催化模拟试验, 但同时也考虑了冰核核化过程对水汽的消耗及对温 度的影响,即假设增加的冰晶是由冰核核化而成, 当过冷水比较多时扣除消耗的云水,当过冷水少时



图 2 2002 年 7 月 22 日模拟回波 G 的中心位置在不同时刻的云水 (Qc)、雨水 (Qr)、冰晶 (Qi)、雪 (Qs)、霰 (Qg) 的比质量垂直廓线 (单位:g/kg): (a) 21:20; (b) 21:30; (c) 22:00

Fig. 2 The vertical distribution of the mass content of cloud water (Qc), rain water (Qr), ice (Qi), snow (Qs), graupel (Qg) through the center of simulated echo G on 22 Jul 2002: (a) 2120 LST; (b) 2130 LST; (c) 2200 LST

试验序号	催化类别	催化高度/km	催化层温度/℃	催化时间	每次催化剂量/L-1	备注
1	单次播撒	5	$-1 \sim -4$	21:20	10^{3}	初生期
2	单次播撒	5.8	$-6 \sim -8$	21:30	10^{3}	发展期
3	单次播撒	6.5	$-8 \sim -11$	22:00	10^{3}	成熟期
4	单次播撒	6.5	$-8 \sim -11$	22:00	10^{4}	成熟期
5	单次播撒	6.5	$-8 \sim -11$	22:00	10^{2}	成熟期
6	10分钟一次	6.5	$-8 \sim -11$	21:30-22:00	10^{4}	发展期
7	10分钟一次	6.5	$-8 \sim -11$	22:00-22:30	10^{4}	成熟期
8	10分钟一次	6.5	$-8 \sim -11$	22:00-23:50	10^{4}	成熟期
9	10分钟一次	6.5	$-8 \sim -11$	22:00-23:50	10^{3}	成熟期
10	10分钟一次	6.5	$-8 \sim -11$	22:00-23:50	10^{2}	成熟期

表 1 不同催化试验的参数设置 Table 1 Parameters of different seeding tests

扣除消耗的水汽,并考虑了冻结或凝华潜热的释放。催化高度选取过冷水含量较多、冰晶数目较少的层次。为了研究催化时机、催化部位、催化剂量 对催化效果的影响,设计了跟踪回波的移动,在不同发展阶段进行增加不同剂量冰晶粒子的催化试验 (表1),其中试验1~5为单次播撒,试验6~10为 多次播撒,播撒区设成以对流回波中心为中心的约 30 km×30 km范围内,多次播撒试验时播撒区随 对流回波的移动而移动。

4 催化引起的降水时空分布变化

将各催化试验的每5分钟雨量和总雨量与未催 化试验相减,在该对流云团主要影响的(29.56°N~ 30.10°N,110.42°E~111.11°E)范围内做雨量的 区域累积,得到雨量变化如图3所示。试验1至试 验5为单次播撒试验(图3a、c),尽管各方案的催 化时刻不一致,但雨量均为催化后15分钟左右开 始变化,并且呈现先减少后增加再减少的趋势。试 验1、试验2和试验3为相同剂量(10³L⁻¹)的情 况下,分别在初生、发展和成熟期播撒。试验1雨 量变化很不明显,试验2出现了增雨效果,试验3 减雨量最大,说明在成熟阶段播撒的效果好于初生 发展阶段播撒;试验3、试验4和试验5为在成熟 阶段改变催化剂量的试验,分别为10³L⁻¹、 10⁴L⁻¹、10²L⁻¹,结果表明催化剂量加大,减雨效 果越明显。试验6至试验10为多次播撒试验,即 在一定时间内每隔10分钟播撒一次,播撒区随对 流回波移动而移动。如图3b、d,与单次播撒结果



图 3 不同催化试验的区域 (29.56°N~30.10°N, 110.42°E~111.11°E) 5 分钟累积雨量 (a, b) 和总累积降水量 (c, d) 减去未催化试验 后的雨量变化随时间演变 (单位: 10⁴t): (a, c) 单次播撒; (b, d) 多次播撒

Fig. 3 Time evolutions of the differences of (a, b) accumulated 5 minutes precipitation and accumulated total precipitation averaged over area (29. $56^{\circ}N-30.10^{\circ}N$, 110. $42^{\circ}E-111.11^{\circ}E$) between the seeding and unseeding tests (units: $10^{4}t$); (a, c) Single seeding tests; (b, d) several times seeding tests

类似的是,各试验均在播撒后 15 分钟左右出现雨 量变化,并且呈现先减少后增加再减少的趋势。试 验 6、试验 7 和试验 8 为相同量剂 (10⁴L⁻¹)的情况 下,分别在发展期、成熟期的 30 分钟内和成熟期 的 110 分钟内播撒,试验 7 的减雨效果好于试验 6, 试验 8 一直都处于减雨状态,说明在成熟阶段进行 多次播撒的效果较好,并且播撒的次数越多减雨效 果越明显。试验 8、试验 9、试验 10 是在成熟期内 多次播撒改变催化剂量的试验,试验 9 (10³L⁻¹) 显示出了减雨效果,试验 10 (10²L⁻¹) 没有明显的 变化, 二者都远小于试验 8 (10⁴L⁻¹)的效果, 说明 过量播撒能达到很好的减雨效果, 这与单次播撒结 果一致。对比图 3c 和图 3d, 多次播撒得到的减雨量 值要大于单次播撒, 说明多次播撒的减雨效果更好。

341

本文最大催化剂量为每次 10⁴L⁻¹,催化范围 30 km×30 km,播撒厚度约 1 km,以此对实际人 影作业用弹量初步估算,若每发炮弹含 30 克 AgI, 成核率 10¹⁵/g,每次大约需要 300 枚火箭,具有技 术可行性,若再增大催化剂量量级则超出实际作业 能力,故本文未做继续加大剂量的试验。通过一系 列的催化试验可以看出,不同试验在催化时间、剂 量上存在差异,但催化后都表现出了较为一致的雨 量变化趋势,说明模式的催化结果是稳定一致的, 并且区域累积雨量得到有效减少,说明人工催化缓 减局地暴雨强度的可能性是存在的。

为了进一步了解催化后降水的空间分布变化, 下面以减雨效果最明显的试验8(22:00~23:50多 次播撒,10分钟一次,催化剂量10⁴L⁻¹)为例进行 分析。如图4,从22:00开始每隔10分钟多次播撒 后,出现持续的雨量减少中心,从 22:20 到 23:00 每5分钟减少的降雨在2~4 mm之间,23:00 开 始,减雨中心周围出现分散的增雨中心,每5分钟 增雨量在0.5~1 mm之间。图5给出催化和未催 化试验在21:00~24:00时段内的降水分布(图5a、 b),以及催化试验减去未催化试验的雨量差(图 5c)。可以看出,降水区雨量最大值由65 mm下降 至50 mm,雨量减少绝对值最大为21 mm,而在减 雨区周围有2~4 mm的增雨区,催化引起了雨量



图 4 催化试验 8 的 5 分钟雨量与未催化试验的雨量差(单位:mm): (a) 22:20; (b) 22:40; (c) 23:00; (d) 23:20。方框: 播撒区 Fig. 4 The differences of accumulated 5 minutes precipitation (mm) between seeding test 8 and unseeding test: (a) 2220 LST; (b) 2240 LST; (c) 2300 LST; (d) 2320 LST. The rectangle depicts the seeding area



图 5 180 分钟内雨量分布 (单位: mm): (a) 未催化试验; (b) 催化试验 8; (c) 催化试验 8 减去未催化试验 Fig. 5 The accumulated 180 minutes precipitation (mm): (a) Unseeding test; (b) seeding test 8; (c) the difference between seeding test and unseeding test

再分布。在受对流回波 G 影响的大约 3600 km² 范 围 (29.56°N~30.10°N, 110.42°E~111.11°E) 内,累积雨量由原来的 56.12×10⁶t 减少了 8.29× 10^{6} t,即为自然雨量的 14.8%, 50 mm 以上降水范 围由原来的 190 km² 缩减到 60 km²,即面积减小到 原来的 31.6%;将降水量与凝结加凝华水量的比值 作为降水效率,未催化试验在 22:00~24:00 时段 内平均降水效率为 70%,催化试验 8 为 61.6%,即 催化使降水效率减少 8.4%。

以上分析的是催化对流云团 (echo G) 主要影 响区 3600 km² 范围内的降水变化,结果显示过量 催化对其产生的局地强降水有较好减雨效果,而催 化对范围更大的区域又有何影响?对整个第三套模 拟区域 (29.1°N~31.8°N,110.0°E~113.1°E) 180 分钟累积雨量变化进行了计算,在大约 9× 10⁴ km²累积雨量减少 2.56×10⁶t,中尺度对流系 统减雨效果不明显,说明大范围降水系统中有增雨 区。从第三套区域降水分布可以看出(图 6),在 echo G 降水区周围 50 km 范围内雨量变化明显, 有减雨区也有增雨区,增雨区出现在降水并不是很 强的地方,更远距离的其他强降水中心雨量变化不 明显。这种大范围对流系统的降水变化是否有规 律,还需深入分析。以上分析表明,局地催化对整



110.5°E 111°E 111.5°E 112°E 112.5°E 113°E

图 6 整个第三套区域未催化试验的 180 分钟内雨量分布(阴 影)以及催化试验 8 的 180 分钟内雨量减去未催化试验的雨量 差(实线为正值,虚线为负值)(单位:mm),方框为催化对流 云团 G 影响区

Fig. 6 The accumulated 180 minutes precipitation in the unseeding test for domain 3 (shaded) and the difference of accumulated 180 minutes precipitation (mm) between seeding test 8 and unseeding test (solid lines depict positive values, dashed lines depict negative values). The rectangle depicts the effect area of seeded echo G 个对流系统来说影响不大。如果要显著减少整个对 流系统的降水,可能不是催化一个对流回波能做到 的,需要针对多个回波再做数值试验。

5 催化影响降水的微物理机制分析

催化试验结果表明,过量播撒可以引起雨量减 少,而降水是在一定的动力热力条件下由云的微物 理过程产生,分析催化后各微物理量分布的变化, 可以了解降水减少的原因。因此,这一节继续以催 化试验 8 为例,对催化影响降水的微物理机制进行 分析。

5.1 催化后 5 分钟水成物变化

在催化后5分钟(22:05),地面降水还没有发 生明显改变,但水成物含量及其转化过程会随着人 工冰晶加入而发生变化。沿 29.82°N 做东西方向 的垂直剖面(如图7和图8所示),催化前云体正处 于成熟阶段, 云水分布与上升运动对应, 在冷区存 在比较多的过冷云水,最大达 2.0 g/kg;在冷区有 少量的过冷雨水,冰晶和雪均分布在-10℃以上的 冷区, 霰的分布对应过冷云水旺盛和上升运动强的 区域,在暖区也存在未融化的霰;对流云强上升气 流最大位于0℃附近,其值为3.0 m/s。催化后各 物理量发生比较明显的改变。由于在一10℃附近增 加了大量冰晶, 受上升气流作用, 冰晶的含水量在 -10~-20℃增加明显,增加最大值为 0.13 g/kg (图 7c),冰晶数浓度在这一高度也由原来的 30 L⁻¹ 增加到 500 L^{-1} 以上 (图 8b), 但对流云的两侧冰晶 数浓度增加达到 1.1×10⁴L⁻¹, 冰晶含水量增加却 很小,这说明在对流云内部增加的大量冰晶通过转 化使冰晶长大增加了冰晶质量,而对流云周围由于 云水条件不足,即使加入大量粒子也不能使冰晶有 效地增长;催化后过冷云水减少(图7a),减少最大 值为 0.7 g/kg; 催化后雪含水量减少 (图 7d), 减 少最大值为 0.12 g/kg, 而数浓度增加 (图 8c), 增 加最大值为 0.7 L⁻¹, 这说明催化后出现了许多小 的雪粒子,但雪可能由于参与其他转化过程而含水 量减少;冷区的霰增加,含水量增加最大值为 1.8 g/kg (图 7e),在零度层附近和以下暖区减少, 减少最大值为 0.4 g/kg, 冷区的霰数浓度增加(图 8d), 由原来的 0.24 L⁻¹增加到 80 L⁻¹; 催化后雨 水大部分减少,含水量减少最大值为 0.5 g/kg (图 7b),但其减少值还未到达地面,在冷区过冷雨的

数目减少,最大减少了 1.0 L⁻¹(图 8a),而在零度 层附近的暖区数浓度增加,增加最大值为 4.5 L⁻¹。 催化同时引起了动力和热力场响应,对流云中上部 的上升运动增强,最大增加 0.15 m/s 位于-10℃ 附近;温度变化显示,在冷区 0~-10℃有所升温, 增加最大值为 0.2℃。

5.2 催化后 60 分钟水成物变化

催化后 15 分钟地面开始出现减雨(图略);催 化后 40 分钟(22:40)地面减雨量值最大(图 4b); 催化后 60 分钟(23:00),在减雨中心的周围出现 了增雨区(图 4c),地面降水出现了再分布,因此对 这一时刻微物理特征进行详细分析。

如图 9 和图 10 所示,23 时云体随高度增加向 东倾斜,110.8°E 以西地区云水大部分集中在暖 区,以东地区则以过冷云水为主,云顶抬升至 12 km,空气沿对流云后部流入,随高度增加向东 倾斜上升,在高空向前辐散流出,最大上升运动为 5 m/s,在云体前侧中下部为下沉气流,最大下沉 运动为1m/s。此时催化试验的微物理场和动力热 力场的分布发生了明显变化,从雨水改变可看出西 部减雨、东部增雨。在一10~-20℃高度主上升气 流两侧冰晶含水量增加,最大达 0.05 g/kg(图 9c),冰晶数浓度增加在相对较低高度,最大达到 6.5×10³L⁻¹(图 10b),由于主上升气流区内讨冷 水含量较丰富,增加冰晶后会迅速与过冷水碰并转 化成其他粒子,而其两侧由于云水条件不足使大量 冰晶粒子累积; 过冷云水减少 (图 9a), 减少最大值 为 0.6 g/kg, 而在零度层附近及其一些暖区增加, 增 加最大值为 1.2 g/kg; 催化后雪含水量减少(图 9d),减少最大值为 0.4 g/kg,这是因为过冷云水减 少使雪的淞附增长过程减弱,数浓度在中层增加 2 L⁻¹而高层减少 2 L⁻¹(图 10c);催化后霰在暖区



图 7 2002 年 7 月 22 日 22:05 未催化试验(阴影)和催化试验 8 减去未催化试验的差值(等值线)沿 29.82 °N 东西向垂直剖面:(a,b,c,d,e) 云水、雨水、冰晶、雪、霰的含水量(单位:g/kg);(f) 垂直速度(单位:m/s);(g) 温度(单位:℃)。方框:22:00 播撒区,虚线: 未催化试验的 0℃、-10℃、-20℃、-40℃等温线,箭头:未催化试验的纬向风(*u*)和垂直运动(*w*×10)的合成风

Fig. 7 The cross sections of physical quantities in unseeding test (shaded) and the differences between seeding test 8 and unseeding test (isolines) along 29.82°N at 2205 LST 22 Jul 2002; Mass content of (a) cloud water, (b) rain water, (c) ice, (d) snow, (e) graupel; (f) vertical velocity (m/s); (g) temperature (°C). The rectangle depicts the seeding area at 2200 LST, the dashed lines depict 0°C, -10° C, -20° C, -40° C isotherms in unseeding test, the arrows depict the synthesis of zonal wind (u) and vertical motion (w×10) in unseeding test



Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the number concentration (L^{-1}) of (a) rain water, (b) ice, (c) snow, and (d) graupel



减少,减少最大值为1.5g/kg,在冷区增加,并且 增加量向东扩展,含水量增加最大值为5g/kg(图



图 9 同图 7, 但为 2002 年 7 月 22 日 23 时。方框: 23 时播撒区 Fig. 9 Same as Fig. 7, but for 2300 LST 22 Jul 2002. The rectangle depicts the seeding area at 2300 LST

9e),数浓度由原来的 0.24 L⁻¹增加到 30 L⁻¹(图 10d);催化后暖区中雨水分布变化明显,西部雨水 继续减少,最大减少 1.2 g/kg,数浓度最大减少 1.0 L⁻¹(图 10a),而东部雨水从高层至低层逐渐增 加降至地面,含水量最大增加 2 g/kg,数浓度最大 增加 9 L⁻¹(图 10b)。催化引起的动力和热力场响 应逐渐增强,催化后 60 分钟(图 9f、g),催化试验 的上升气流大值中心区较未催化时减弱,最大减少 4 m/s,而在西侧云水含量较多的地方上升运动仍



图 10 同图 8, 但为 2002 年 7 月 22 日 23 时。方框: 23 时播撒区 Fig. 10 Same as Fig. 8, but for 2300 LST 22 Jul 2002. The rectangle depicts the seeding area at 2300 LST

为增强,最大增加 1.5 m/s;温度变化显示,在冷 区大部分为升温,最大增加 1.6℃,位于 0℃附近, 在 4 km 附近为降温,最大减少 1.2℃,在低层东部 为升温西部为降温。

5.3 催化后 60 分钟减雨区微物理机制分析

催化后 60 分钟, 减雨中心 (29.85°N, 110.8°E) 在催化和未催化时的雨滴源项、粒子尺度和落速如 图 11 所示, 雨滴源项的变化表明 (图 11a), 霰碰并 云滴成雨过程 (Ccg) 在暖区减小, 霰的融化过程 (Mgr) 在暖区几乎消失, 使雨滴的初生减少, 说明 在暖区霰含量的减少是减雨的主要原因。而暖区霰 的减少又是如何引起的呢?分析催化和未催化的粒 子尺度和落速 (图 11b 和图 11c)可知, 未催化时霰 分布于 1~11 km, 最大平均直径为 0.3 cm, 最大 落速为 7 m/s, 而催化后霰分布于 4~11 km, 暖区 的霰基本消失, 最大平均直径下降至 0.08 cm, 最 大落速减小至 2.7 m/s。云体垂直上升运动在未催 化时位于 6.5 km 为 3.2 m/s, 而催化后最大上升 运动下移至 5.5 km 并增加了 0.5 m/s。从霰落速 和垂直上升运动大小相比可知,催化后霰落速在 7 km以下小于上升运动,使霰很难下落至暖区融化 成雨而大部分滞留于冷区上空。催化后雨滴的平均 直径有所减小,雨滴的落速在 3~7 km 的高度也明 显下降,但催化前后雨滴落速始终大于上升运动。 降雨减少的原因主要是由生成大量尺度很小的霰粒 子难于下落暖区融化所致。霰的变化是因为催化初 期增加了大量冰晶,使冰晶碰并过冷雨水转化成霰 这一过程明显增加(图略),使霰的初生过程大大 加强,产生了很多尺度小的霰粒子,影响了霰的落 速,同时这一过程也消耗了过冷雨水,是造成减雨 的另一个主要原因。

以上分析表明,雨水比质量减少的原因是霰融 化(Mgr)、霰在暖区碰并云滴成雨(Ccg)这二个 雨滴源项减少,使雨滴的初生减弱,同时冰晶碰并 过冷雨水转化成霰这一过程增加,也消耗了过冷雨 水。对雨滴影响最大的是霰,由于霰粒子浓度增大 而粒子平均尺度减小,导致霰落速减弱而小于上升 运动,使霰难于下落至暖区融化成雨而大部分滞留 于冷区上空,是雨水减小的主要原因。

5.4 催化后 60 分钟增雨区微物理机制分析

催化后 60 分钟, 在减雨区的东侧出现增雨区。 通过地面增雨中心 (29.85°N, 110.97°E) 分析此时 催化后微物理转化过程变化。雨滴源项变化如图 12a 所示, 未催化时雨滴的形成主要来自雪和霰的 融化 (Msr, Mgr), 催化后, 霰的融化 (Mgr) 在 0℃附近的 4~5 km 明显增加。此处粒子尺度的变 化如图 12b, 虽然催化后雨滴比质量和数浓度同时 增加, 但雨滴的平均直径分布在 3~7 km 高度有所 减小,而霰粒通过淞附和碰并冰晶增长,霰比质量 由 2.4 g/kg 增加到 7.0 g/kg,但数浓度由 0.24 L⁻¹ 增加到 30 L⁻¹,使霰的平均直径由 0.4 cm下降至 0.15 cm。这种变化对粒子下落速度也有很大影响 (图 12c),雨滴和霰的落速在催化后明显减小,霰 落速由未催化时 6~7 m/s下降至 2~4 m/s,雨滴 的落速由 8 m/s下降至 6 m/s。但此处垂直运动与 减雨区有很大不同,在未催化时云体垂直运动在 6 km以上为上升运动,最大为 2 m/s,在 6 km 以 下为下沉运动,最大为0.5 m/s,催化后上升运动增



图 11 2002 年 7 月 22 日 23 时减雨中心 (29.85°N, 110.8°E) 未催化试验 (n, 虚线) 和催化试验 8 (s, 实线) 物理量垂直廓线: (a) 雨滴 源项转化率 (单位:g·kg⁻¹·s⁻¹, Ccr:雨滴碰并云滴, Ccg:霰在暖区碰并云滴, Mgr:霰的融化); (b) 霰 (Rg) 和雨滴 (Rr) 平均直径 (单位:cm); (c) 垂直速度 (W) 和霰 (Vg)、雨滴 (Vr) 落速 (单位:m/s)

Fig. 11 The vertical profiles of physical quantities in unseeding test (n, dashed line) and seeding test 8 (s, solid line) at decreased rainfall center (29.85°N, 110.8°E) at 2300 LST 22 Jul 2002: (a) Conversion rates of rain water sources, Ccr: collection of cloud water by rain water, Ccg: collection of cloud water by graupel in the warm region, Mgr: the melting of graupel; (b) the averaged diameters of graupel (Rg) and rain water (Rr); (c) vertical velocity (W) and the fall speed of graupel (Vg) and rain water (Vr)



图 12 同图 11, 但为增雨中心 (29.85°N, 110.97°E)。(a) Msr: 雪的融化, Mgr: 霰的融化 Fig. 12 Same as Fig. 11, but for the increased rainfall center (29.85°N, 110.97°E). (a) Msr: the melting of snow, Mgr: the melting of graupel

加了 0.05 m/s, 下沉运动也加强了 1 m/s, 催化后 霰落速虽然减小, 但始终大于垂直运动, 这与减雨 区的情况相反, 因此增加的霰可以下落至暖区融化 造成增雨。

以上分析表明,增雨区雨水的增加主要来自于 霰的融化增加,催化后雨滴和霰的粒子尺度减小, 同时下落速度减小,但都大于上升运动,增加的霰 粒子通过下落融化造成暖区雨滴的增加,雨滴通过 下落使地面增雨。

6 结论和讨论

本文利用耦合了中国气象科学研究院双参数微 物理方案的中尺度数值模式 MM5,对 2002 年 7 月 22~23 日发生在长江中游一次梅雨锋暴雨过程进 行了人工缓减暴雨的数值试验。在对降水多尺度结 构进行正确模拟的基础上,针对中尺度对流系统生 命史较完整的一个对流回波进行增加冰晶的过量催 化试验,设计了不同时段、不同剂量的多个播撒方 案,重点分析了减雨的可能方法和微物理机制。得 出如下主要结论:

(1)催化试验结果表明,在 -8~-11℃的高度上过冷水丰富区域进行冰晶的过量播撒能够使区域降水减少,云体成熟期播撒好于初生和发展期播撒,多次播撒好于单次播撒,播撒剂量加大时减雨效果越明显。播撒效果最好的为 2 小时内每 10 分钟一次的多次播撒试验,播撒剂量为 10⁴ L⁻¹冰晶时,降水中心雨量减少绝对值最大为 21 mm,在 3600 km² 内减少雨量 8.29×10⁶ t,即为自然雨量的 14.8%,其中 50 mm 以上降水范围由原来的190 km² 缩减到 60 km²,即面积减小到 31.6%,催化达到减少局地强降水中心雨量目的。但催化单一对流回波并未使整个对流系统的累积雨量有明显变化,在整个模拟区域大约 9×10⁴ km²范围内累积雨量仅减少 2.56×10⁶ t。

(2)不同催化方案得到了比较稳定一致的结 果,播撒后15分钟左右出现雨量变化,并且呈先 减少后增加的趋势。雨量变化的水平分布表明,播 撒后首先出现明显的雨量减少中心,持续一个小时 后,减雨中心的周围出现分散的增雨中心,并且下 风方增雨量多,这说明催化引起地面降水的再分 布。

(3) 过量催化后会引起水成物的分布发生明显

的变化。雨水比质量减少是由于霰融化、霰在暖区 碰并云滴成雨这二个雨滴源项减少,使雨滴的初生 减弱,而冰晶碰并过冷雨成霰增加,也消耗了过冷 雨水,抑制雨水增长。霰通过冰晶碰并过冷雨等过 程形成,使霰粒子浓度增大而粒子平均尺度减小, 导致霰落速减弱而小于上升运动,使霰难于下落至 暖区融化成雨而大部分滞留于冷区上空,是雨水减 小的主要原因。

3/19

(4)催化后周围升速小的弱雨区降水略有增加,雨水的增加主要来自于霰的融化增加。在催化初期有大量霰粒滞留于冷区,这些霰粒通过淞附和碰并冰晶增长,虽然与未催化时相比雨滴和霰的粒子尺度减小,同时下落速度减小,但由于弱雨区的上升运动较弱,增加的霰粒子能够下落融化造成暖区雨滴的增加,雨滴通过下落使地面增雨。

本文利用数值模式对人工缓减暴雨做了初步研究,不足之处在于缺乏对云中微物理变量的直接探测结果进行对比分析,今后应加强对自然云以及催化云中云物理量的观测和研究。文中催化时将人工冰晶与自然冰晶叠加到一起,这与单独处理人工冰晶有一定区别,今后要不断改进数值模式,如增加人工冰晶单独处理过程或模拟 AgI 催化剂核化扩散过程等,以得到更接近实际的结果。

参考文献 (References)

- Braham R R J, Flueck J A. 1970. Some results of the Whitetop experiment [C]. Preprints of Second National Conference on Weather Modification, 6 – 9, 176 – 179.
- Braham R R J. 1986. The cloud physics of weather modification [J]. WMO, Bulletin, No. 7, 10.
- Dennis A S, Koscielski A. 1969. Results of a randomized cloud seeding experiment in South Dakota [J]. J. Appl. Meteor., 8 (4): 556-565.
- Dennis A S, Schock M R. 1971. Evidence of dynamic effects in cloud seeding experiments in South Dakota [J]. J. Appl. Meteor., 10 (6): 1180-1184.
- 方春刚,郭学良,王盘兴. 2009. 碘化银播撒对云和降水影响的中 尺度数值模拟研究 [J]. 大气科学,33 (3):621-633. Fang Chungang, Guo Xueliang, Wang Panxing. 2009. The physical and precipitation response to AgI seeding from a mesoscale WRFbased seeding model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3):621-633.
- 何宏让,魏绍远,刘晓明. 1999. 初始冰核浓度对冷云对流性降水 影响的数值试验 [J]. 气象科学,19 (1):42-49. He Hongrang, Wei Shaoyuan, Liu Xiaoming. 1999. The numerical test of

initial ice nuclei concentration effect on cold cloud convectional precipitation [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 19 (1): 42-49.

- 胡志晋, 严采繁. 1986. 层状云微物理过程的数值模拟(一)微物理 模式 [J]. 中国气象科学研究院院刊,1(1):37-52. Hu Zhijin, Yan Caifan. 1986. Numerical simulation of microphysical processes in stratiform clouds (I)—Microphysical model [J]. Journal of Academy of Meteorological Science (in Chinese), 1 (1):37-52.
- 胡志晋, 何观芳. 1987. 积雨云微物理过程的数值模拟(一)微物理 模式 [J]. 气象学报, 45 (4): 467 - 484. Hu Zhijin, He Guanfang. 1987. Numerical simulation of microprocesses in cumulonimbus cloud (II)—Microphysical model [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 45 (4): 467 - 484.
- Langmuir I. 1950. Control of precipitation from cumulus clouds by various seeding techniques [J]. Science, 112: 35-41.
- 李大山,章澄昌,许焕斌,等. 2002. 人工影响天气现状与展望[M]. 北京:气象出版社. 586pp. Li Dashan, Zhang Chengchang, Xu Huanbin, et al. 2002. The Current Status and View of Weather Modification (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 586pp.
- 楼小凤. 2002. 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 [D]. 北京大学博士学位论文, 127pp. Lou Xiaofeng. 2002. Development and implementation of a new explicit microphysical scheme and comparisons of original schemes of MM5 [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese). Peking University, 127pp.
- 毛节泰,郑国光. 2006. 对人工影响天气若干问题的探讨 [J]. 应用 气象学报, 17 (5): 643 - 646. Mao Jietai, Zheng Guoguang. 2006. Discussions on some weather modification issues [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 17 (5): 643 - 646.
- Orville H D, Kopp F J, Farley R D, et al. 1989. The numerical modeling of ice-phase cloud seeding effects in a warm-base cloud [C]. Cloud Physics and Weather Modification Research Program, Beijing, China, WMO/TD, (269): 203 – 207
- Orville H D. 1996. A review of cloud modeling in weather modification [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (7): 1535-1555.
- Schaefer V J. 1946. The production of ice crystals in a cloud of supercooled water droplets [J]. Science, 104: 457-459.

- 史月琴, 楼小凤, 邓雪娇, 等. 2008a. 华南冷锋云系的中尺度和微物理特征模拟分析 [J]. 大气科学, 32 (5): 1019-1036. Shi Yueqin, Lou Xiaofeng, Deng Xuejiao, et al. 2008a. Simulations of mesoscale and microphysical characteristics of cold front clouds in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (5): 1019-1036.
- 史月琴, 楼小凤, 邓雪娇, 等. 2008b. 华南冷锋云系的人工引晶催 化数值试验 [J]. 大气科学, 32 (6): 1256-1275. Shi Yueqin, Lou Xiaofeng, Deng Xuejiao, et al. 2008b. Seeding numerical experiments of cold front clouds in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (6): 1256-1275.
- 孙晶,楼小凤,胡志晋,等. 2007. 梅雨期暴雨个例模拟及其中小尺 度结构特征分析研究 [J]. 大气科学, 31 (1): 1-18. Sun Jing, Lou Xiaofeng, Hu Zhijin, et al. 2007. A numerical simulation on Meiyu torrential rain and analysis of mesoscale and microscale structure of convective systems [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (1): 1-18.
- 汪学林,谷淑芳,于勇,等. 2001. 两次江淮气旋的云雨特征及其人 工播云效果的综合分析 [J]. 应用气象学报,12 (增刊):48-57. Wang Xuelin, Gu Shufang, Yu Yong, et al. 2001. Two case studies of characteristics of rains and clouds over Jianghuai cyclone and the composite analysis of artificial seeding effectiveness [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (Suppl.): 48-57.
- 叶家东. 1993. 关于人工抑制暴雨问题 [J]. 南京气象学院学报, 16 (3): 373-378. Ye Jiadong. 1993. On the possibility of artificial suppression of heavy rains [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 16 (3): 373-378.
- 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):336-344. Ye Jiadong, Fan Beifen, Du Jingchao. 1998. Study of negative effects in artificial precipitation enhancement experiments [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese),9(3):336-344.
- 赵思雄,陶祖钰,孙建华,等. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分 析研究 [M]. 北京: 气象出版社, 281pp. Zhao Sixiong, Tao Zuyu, Sun Jianhua, et al. 2004. Study on Mechanism of Formation and Development of Heavy Rainfalls on Meiyu Front in Yangtze River (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 281pp.