

# 用 MM5 模式 Reisner 霰方案对华南暴雨的数值模拟<sup>①</sup>

孙 晶 王鹏云

(中国气象科学研究院,北京 100081)

## 提 要

利用 MM5 中尺度数值模式对 1998 年 6 月 8~9 日华南暴雨进行了模拟,用 Reisner 霰方案模拟了可分辨尺度降水,详细分析了暴雨的微物理过程。结果表明,Reisner 霰方案对华南暴雨具有较好的模拟能力。在降水最大时段,霰和云水是形成雨水的主要来源,云水的碰冻是产生霰的主要微物理过程。

关键词: 华南暴雨 中尺度数值模式 MM5 云显式降水方案

## 引 言

对华南前汛期暴雨的研究已有多年的历史,研究大多着重于华南准静止锋的形成和维持、暴雨的水汽输送、风场结构、中尺度对流系统等天气学方面<sup>[1,2]</sup>,对暴雨的微物理过程的研究相对较少。中尺度暴雨是在一定动力热力条件下通过内部的微物理过程形成的,反之,微物理过程中水成物相态变化产生的潜热释放和降水产生的拖曳对环境的热力动力过程也有不可忽视的作用。因此,研究暴雨的微物理过程及其与动力热力过程的相互作用是认识中尺度暴雨发生发展不可缺少的重要方面。

本文用含有 Reisner 霰方案的高分辨率非静力平衡模式 MM5(V3),对 1998 年 5~6 月在广东、福建进行的“海峡两岸及邻近地区暴雨试验”(HUAMEX)期间 6 月 8~9 日的降雨过程进行模拟,对华南暴雨微物理过程进行初步分析。

## 1 模式及显式云物理方案

本文使用非静力模式 MM5(V3)对暴雨进行模拟,采用华南季风和南海试验观测资料同化得到的  $1^\circ \times 1^\circ$  格点资料作为背景场,利用华南暴雨试验,南海季风试验和 GTS 的观测资料进行订正后,经过插值得到模式的

初、边条件。从 1998 年 6 月 8 日 12 时(世界时,下同)开始模拟,积分 24 小时,9 日 12 时结束。模式水平网格为  $75 \times 81$ ,垂直方向分 23 层,水平格距为 30km,中心点为 ( $20^\circ\text{N}$ 、 $112^\circ\text{E}$ ),模拟范围覆盖了华南大部分地区及南海海面。选用 Kain-Fritsch 对流参数化方案模拟不可分辨尺度降水,Reisner 霰方案模拟可分辨尺度降水。

在 MM5(V3)的云显式降水方案中,Reisner 霰方案考虑的微物理过程比较全面,也比较复杂<sup>[3]</sup>。包括 7 个预报量:水汽( $q_v$ )、云水( $q_c$ )、雨水( $q_r$ )、冰晶( $q_i$ )、雪( $q_s$ )、霰( $q_g$ )、冰晶数浓度( $N_i$ )。考虑了 31 种物理过程(见表 1)。

$P_{qqq}$  表示源汇项的质量混合比,下标定义为: $xdep$  为  $x$  的凝华增长, $xm1t$  表示  $x$  的融化, $xcny$  表示  $x$  向  $y$  自动转换, $xfzy$  表示  $y$  冷却变成  $x$ , $xacy$  表示  $y$  与  $x$  碰并产生  $x$ , $x.yacz$  表示  $z$  与  $y$  碰并产生  $x$ , $idsn$  表示冰晶的核化, $ispl$  表示冰晶的繁生过程, $Pmltge$  表示融化霰的蒸发, $Pmltev$  表示融化雪的蒸发, $Pgacxm$  表示  $x$  与霰依附,使霰融化成雨。

① 资助项目:攀登专项 95-专-03 基础科学专业研究项目 2001CCA02200。

表1 MM5(V3)中 Reissner 霰方案的物理过程

物理过程	源汇项名称
凝结和蒸发	Pccnd, Pprevp, Pmltge, Pmltev
碰并	Pgacr, Pgcaw Piacr, Piacw, Piaci Praci, Pracs, Pracw Psaci, Psacr, Psacw
自动转化	Pccnr, Picns, Picng, Pscng
冻结	Pgfzr, Pifzc
融化	Pimlt, Pgmilt, Psmilt, Pgcarm, Pgcawm
升华和凝华	Pidep, Pgdep, Psdep
核化和繁生	Pidsn, Pisp

2 模拟结果与实况的比较

8日12时到9日12时,是珠江口地区降水最大的时段,实测香港为暴雨,418mm,从8日18时开始连续3个6小时雨量超过120mm。珠海24h降雨量也达到221.8mm。模拟的雨带位置比实况略偏南约50km,降水集中在8日18时至9日06时,模拟的最大降雨量为340mm,其中显式方案降水占总雨量的76%,占主导地位(图略)。

在降水比较大的8日23时,实际降水率显示在5km高度上香港地区最大为2~5mm·h<sup>-1</sup>。用雨水、冰晶、雪、霰模拟出500hPa高度(大约为5km)的降水率,得出其值最大为3.3mm·h<sup>-1</sup>,与实际比较吻合(图1和图2)。

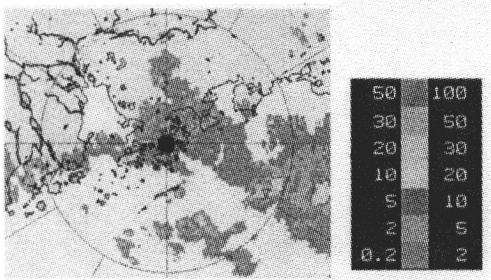


图1 1998年6月8日23时香港雷达CAPPI的5km高度的降水率  
单位:mm·h<sup>-1</sup>

3 水成物的分布

降水最大的时刻8日22时,在降水中心的上方(图3),液态的云水从地面上方950hPa一直延伸到250hPa,主要集中在0℃线附近的600~400hPa;在云水上方,从300hPa至100hPa为冰晶构成的冰云;固态的雪和霰存在于600~200hPa高度,其中在

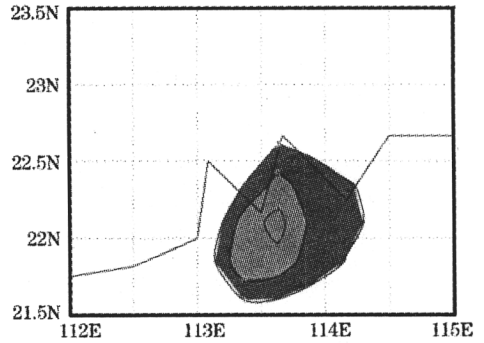


图2 模拟的1998年6月8日23时500hPa高度的降水率  
单位:mm·h<sup>-1</sup>

0℃线的下方的正温度区(600~550hPa)为尚未融化的部分。可见在550~250hPa高度范围既有液态的云水,又有固态的雪和霰;在这一高度范围内存在上升速度最大值1.8m·s<sup>-1</sup>,产生的对流造成过冷云水、雨水与雪、霰撞冻,使得雪、霰的比水量迅速增加,在零度层上方达到最大值(分别为0.6g·kg<sup>-1</sup>和2.4g·kg<sup>-1</sup>),并且霰产生于云水的大值区。在0℃层下,霰和雪融化后下落及其与云水碰并,形成雨水最大值(2.79g·kg<sup>-1</sup>),并形成了地面降水。在地面降水较弱的地区,云水和霰主要都集中在0℃线附近的600~400hPa,并位置有所北移。雨水随着霰和云水移动,由于霰和云水都比较小,所以雨水也很弱。可见霰参加的冷云过程对降水形成起主导作用,霰与云水的含量与分布对雨水的形成有重要影响(图略)。

4 降水最大时段内水成物和源汇项的分析

水成物及各源汇项的分布和大小在同一时段的不同层次有很大差别。模拟的8日21~22时降水量达最大为45mm,与实况的40mm基本吻合,因此输出了下落前各水成物及其源汇项在这一时段的变化量。

4.1 雨水和其源汇项

下落前雨水的增长主要分布在中层的16~8层(模式的σ层,下同),增长最大的是在第10层,为82.1g·kg<sup>-1</sup>(图4)。雨水的源项有9个。在通过地面降水中心格点(44,42)即(21.6°N,113.6°E)的垂直方向上,雨水各个源项的大小如表2所示,可看出比较

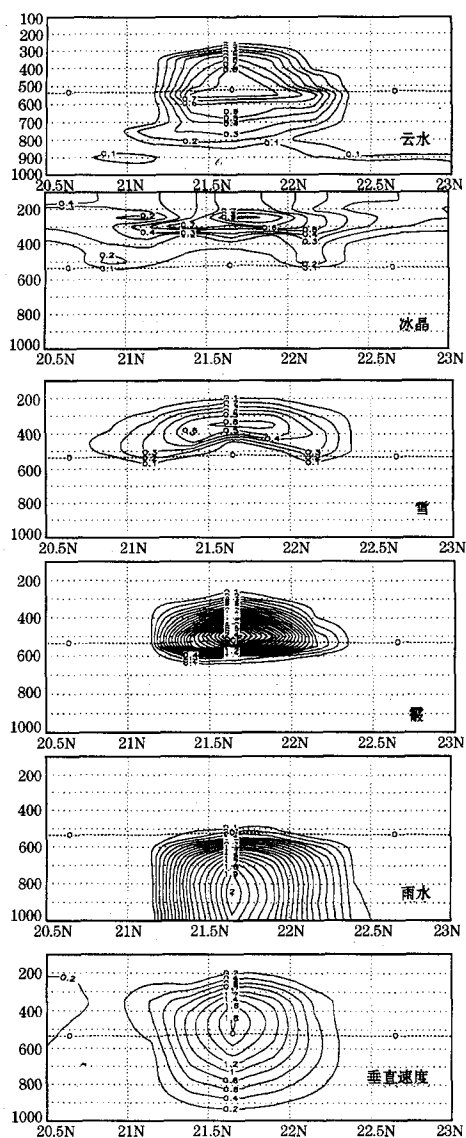


图3 1998年6月8日22时沿113.6°E的各水成物垂直分布图

大的源项有 Pgmilt、Pracw、Pgacw、Pccnr, 从表2和图4可看出:

(1) Pgmilt、Pracw 和 Pgacw 是雨水产生的主要物理过程。它们的最大量级都可达到  $10\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 并且分布的位置和形状与雨水的位置和形状非常相似(图略)。在中间第10层, Pgmilt 和 Pgacw 比 Pracw 作用大, 这是由于霰在这层的含量达到最大。在中低层的20~11层则是 Pracw 起主要作用。

(2) Pccnr 的最大量级为  $1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 要比 Pracw 小一个量级。但是在零度层以上, Pccnr 的作用大于 Pracw; 在零度层以下, Pracw 的作用大于 Pccnr。

(3) Pgacrm 的最大量级为  $1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , Pgacwm 的最大量级为  $0.1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 它们都在中间的第10层达到最大, 这是由于霰在这一层的值最大。

(4) 与雪有关的项 Psacw、Psmlt 和 Pracs 的量级最小, 这与雪在雨水分布大值区含量少有关。

表2 1998年6月8日21~22时  
下落前雨的源项及其分布特征

雨的源项	物理意义	最大层次	大小/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
Pgmilt	霰融化成雨	10	46.0
Pracw	云水与雨水碰并生成雨	12	21.0
Pgacw	云水与融化的霰碰并生成雨	10	12.0
Pccnr	云水自动转换成雨	9	5.0
Pgacrm	雨水与霰依附, 使霰融化成雨	10	2.3
Pgacwm	云水与霰依附, 使霰融化成雨	10	0.5
Psacw	云水与融化的雪碰并生成雨	14	$1.0\times 10^{-7}$
Psmlt	雪融化成雨	14	$1.7\times 10^{-8}$
Pracs	融化的雪与雨水碰并成雨	14	$3.4\times 10^{-13}$

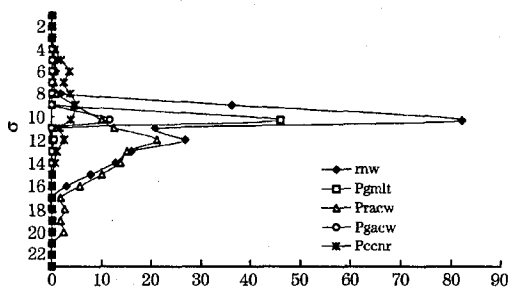


图4 下落前雨(rmw)及雨的主要源项在通过(44, 42)点的垂直分布图(1998年6月8日21~22时, 单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 垂直坐标为模式 $\sigma$ 层)

#### 4.2 霰和其源汇项

降水最大时段里, 下落前霰的增长主要分布在零度层以上的8~4层, 量级为  $1\sim 10\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 最大在第7层, 为  $29.1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (图5)。零度层以下的11~9层为霰的减少层, 霰在第10层减小最大为  $73.1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 这是由于霰的汇项作用明显大于源项作用, 融化项 Pgmilt 导致了霰的减少、雨水的增加。霰的源项有12个。在通过地面降水中心格点(44, 42) 即(21.6°N, 113.6°E) 的垂

直方向上,霰的各个源项的大小如表3所示,可看出比较大的源项有Pgacw、Pgacr、Pg.sacw、Pg.racs、Pg.sacr。从表3和图5可看出:

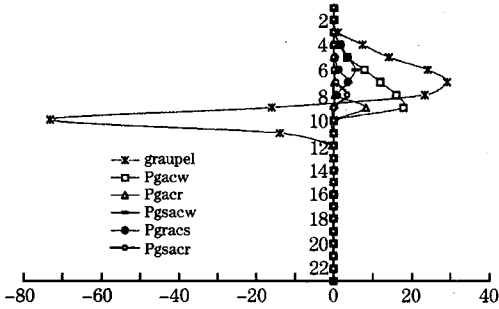


图5 下落前霰(graupel)及霰的主要源项在通过(44,42)点的垂直分布图(1998年6月8日21~22时,单位:  $g \cdot kg^{-1}$ , 垂直坐标为模式  $\sigma$  层)

表3 1998年6月8日21~22时  
下落前霰的源项及其分布特征

霰的源项	物理意义	最大层次	大小/ $g \cdot kg^{-1}$
Pgacw	云水与霰碰并, 冻结成霰	9	17.8
Pgacr	雨水与霰碰并, 冻结成霰	9	8.2
Pg.sacw	云水与雪碰并, 冻结成霰	6	5.5
Pg.racs	雪与雨水碰并, 冻结成霰	7	4
Pg.sacr	雨水与雪碰并, 冻结成霰	8	4
Pscng	雪自动转化成霰	6	2
Pg.iacw	云水与冰晶碰并, 冻结成霰	4	0.81
Pgfzr	雨水自动冻结成霰	4	0.4
Pg.iacr	雨水与冰晶碰并, 冻结成霰	7	0.04
Pg.raci	冰晶与雨水碰并, 转化成霰	8	0.03
Pgdep	霰的凝华增长	2	$0.45 \times 10^{-4}$
Picng	冰晶自动转化成霰	8	$3 \times 10^{-12}$

(1) Pgacw 是产生霰最主要微物理过程,量级可达到  $10g \cdot kg^{-1}$ ,在零度层上这一项达到最大值  $17.8g \cdot kg^{-1}$ 。由于在这一层上云水的分布达到最大,云水与霰碰冻从而导致霰在这一层上的分布达到最大,说明云水是形成霰的主要来源。

(2) Pgacr、Pg.sacw、Pgracs、Pgsacr 和 Pscng 的量级最大可达到  $1g \cdot kg^{-1}$ ,水平分布与霰基本相似,在高层这些源项的作用仅次于Pgacw。其中Pgacr、Pscng、Pgracs 和 Pgsacr 是雨水、雪的自身转化或相互碰并过程,

这些过程对霰的产生起主要作用。

(3) Pg.iacw、Pgfzr、Pg.iacr、Pg.raci、Pgdep 和 Picng 的最大量级为  $0.1g \cdot kg^{-1}$  及其以下,相对较小。其中 Pgfzr、Picng、Pg.iacr 和 Pg.raci 是雨水、冰晶的自身转化或相互碰并过程,这些过程对霰的产生作用不明显。

### 5 小结

本文用含有 Reisner 霰方案的高分辨率非静力平衡中尺度数值模式 MM5(V3),对1998年6月8~9日的一次华南暴雨过程进行了模拟,给出了降水最大时段内下落前霰和雨水及其源汇项的累积量。通过研究,得出如下初步结论:

(1)最大降水时段内,在零度层之上,过冷云水自动转换成雨;在零度层附近,霰的融化以及云水与融化的霰发生碰并,使雨水含量迅速加大;在零度层之下,云水的碰并过程使雨水继续增长。

(2)霰的分布与云水关系密切,云水的碰冻是产生霰的最主要微物理过程。雨水和霰及雪的碰并过程对形成霰的作用仅次于云水。

(3)因此,具有汽、水、冰三相混合作用的冷云过程是华南暴雨形成发展的主要云物理过程,这与对1998年5月23~24日个例的模拟结论是一致的<sup>[4]</sup>。

致谢:感谢中国气象科学研究院的赵平同志和孙健同志为本文提供了初始场方面的帮助。

### 参考文献

- 1 薛纪善. 1994年华南夏季暴雨研究. 北京:气象出版社, 1996.
- 2 赵思雄, 贝耐芳, 孙建华. 华南暴雨试验期间(HUAMEX)强对流系统的研究, 海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究. 北京:气象出版社, 2000: 251~260.
- 3 J. Reisner. R. M. Rasmussen and R. T. Bruintjes. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. Q. J. R. Meteorol. Soc., 1998, 124: 1071-1107.
- 4 王鹏云, 阮征, 康红文. 华南暴雨中云物理过程的数值研究. 应用气象学报, 2002, 13(1): 78~87.

# Numerical Study of Heavy Rainfall in South China with Reisner Graupel Scheme

Sun Jing Wang Pengyun

(Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081)

## Abstract

The heavy rainfall during 8~9 June 1998 is simulated by using the non-hydrostatic mesoscale MM5(V3). The discriminable scale rainfall is simulated by using the Reisner Graupel scheme. Results show that the Reisner Graupel scheme has a better ability to simulate the microphysical process. During the period of the maximal precipitation, the most important sources for the rain-water are the graupel and cloudwater. And the cloudwater's accretion is the main microphysical process for the graupel.

**Key Words:** heavy rainfall in South China MM5 cloud explicit precipitation scheme