

文章编号: 1006-4354 (2004) 01-0011-04

MM5 中尺度模式及其微物理过程

戴 进¹, 余 兴¹, 岳治国²

(1. 陕西省气象科学研究所, 陕西西安 710015; 2. 陕西省人工影响天气办公室, 陕西西安 710015)

摘 要: 按照模块功能, 介绍了 MM5 中尺度模式中各个子模块的主要作用, 描述了模式中微物理过程的对流参数化方案和显式方案, 为模式在研究和预报应用提供参考。

关键词: MM5; 中尺度模式; 微物理过程

中图分类号: P456.7 **文献标识码:** A

在强大计算机能力的支持下, MM5 中尺度模式正在天气预报、理论模拟研究等方面发挥着愈来愈重要的作用。该模式可用于对季风、飓风、暴雨和气旋, 以及中 β 和中 γ 尺度对流系统和城市热岛等多种天气现象预报和模拟研究。在中尺度模式中, 包含了多种重要的物理过程, 如微物理过程、边界层过程、辐射、扩散等。在这些过程中, 微物理过程是一个非常关键的环节, 它是指模式区域水汽和水成物之间相互转化, 即成云致雨过程及其相应的动力热力效应。在许多中尺度模式中, 降水本身即是预报的对象, 同时微物理过程相变释放的潜热和水成物粒子的拖曳对模式的热力和动力过程也有较大的影响。因此, 微物理过程不仅影响了降水预报, 而且对模式的动力过程也十分重要。陈静等^[1]利用 MM5 模式, 以中国 2001 年 8 月的 4 个暴雨作为个例, 研究了非绝热物理过程对暴雨动力和热力场预报的影响, 分析了利用模式扰动方法开展暴雨研究的可能性。王鹏云等^[2]利用 MM5 模式, 模拟研究了 1998 年 5 月 23—24 日自粤北移向南海海岸的冷锋及锋前对流云团造成的华南暴雨的云物理过程。康丽莉等^[3]对 1999 年 6 月下旬发生在江淮流域的梅雨锋暴雨进行数值模拟试验, 研究了 MM5 中不同微物理过程对模拟梅雨锋暴雨的影响。

1 MM5 模式

MM5 模式起源于 Anthes 70 年代早期使用

的一个中尺度模式, 是近年来由美国大气研究中心 (NCAR) 和美国宾州大学 (PSU) 在 MM4 基础上联合研制并发展起来的, 是较先进的中尺度数值预报模式之一。经过不断的发展和完善, 在初始场和边界的处理、动力场的处理都有很大的优势。该中尺度模式具有下列主要功能: 非静力动力框架, 多层网格嵌套, 多种物理过程选项, 四维变分等。它不仅能用于理论模拟研究, 也能与业务运行的谱模式嵌套做细致的区域预报。MM5 模式的模块按功能可分为 3 部分: 前处理、主模块和后处理。前处理包括 TERRAIN、REGRID、RAWINS/little_r、INTERPF 和 NESTDOWN, 主模块是 MM5, 后处理包括 INTERPB、GRAPH 和 RIP。

TERRAIN 模块是 MM5 模式的第一步。TERRAIN 首先根据给定的中心经纬度和定义的各重网格的维数, 计算模拟区域中尺度网格上各个网格点的地理位置, 然后把已有的经纬网格上的地形高度、植被类型数据水平插值到网格上。

REGRID 模块把各种等压面上的资料内插到中尺度网格上。REGRID 分为两部分: pregrid 和 regridder。Pregrid 把资料源中的数据转换成 regridder 所要求的固定格式的中间文件, 而 regridder 生成 MM5 主模式所要求的大尺度初始场, 即 REGRID 的最终输出结果。Pregrid 提供了读取 NCEP、ECMWF 等再分析资料的程序。如

果所获得的资料源不在 Pregrid 的支持范围之内, 需要编制程序读取数据并写成中间文件。

RAWINS/little_r 模块利用观测资料对粗糙的大尺度场进行订正, 并加入中尺度信息。RAWINS 和 little_r 间也存在一些区别, 首先, RAWINS 只能使用 NCAR 存档的固定格式的高空和地面观测资料, 而 little_r 却能使用各种来源的常规观测资料, 只是在观测资料输入前, 需要转换成 little_r 所需要的格式。其次, RAWINS 能垂直插值生成新的高度层, 而 little_r 却不能。

INTERPF 模块把 REGRID 或 RAWINS/little_r 输出的等压面资料垂直插值到地形坐标 σ 面上, 为 MM5 主模式提供初始条件和边界条件。其输出文件也可被 NESTDOWN 用来为更高分辨率的网格生成初始条件和条件。

NESTDOWN 模块在地形坐标 σ 面上, 把物理量场从粗糙网格水平插值到高分辨率网格上, 为高分辨率网格提供初始条件。插值过程中, TERRAIN 提供高分辨率网格的地理位置信息, 而物理量场信息来自 INTERPF 的输出文件, 也可来自 MM5 的输出文件。

MM5 主模式是整个模拟系统的核心部分, 模式控制方程为大气非静力平衡原始方程, 垂直结构为 σ 坐标, 水平结构采用 B 型跳点网格, 考虑了较真实的地形和下垫面分类资料, 采用分裂时间积分方案。由于 MM5 中含有声波的传播, 为了保持数值计算的稳定, 模式方程组中的某些项采用短时步进行计算。物理过程包括大气水平与垂直涡动扩散, 积云对流参数化及显式微物理过程方案, 太阳短波辐射及大气长波辐射方案和整层或高分辨的行星边界层方案等。模式的分辨率、垂直层次、计算域大小及各种物理过程均可根据需要进行选择, 灵活方便。

MM5 主模式应用牛顿松弛技术实现四维同化功能, 利用这项功能可以启用动力初始化, 得到包含观测信息尽可能多且动力平衡的初始场, 也可以利用这项功能来获得同时考虑动力过程和观测信息的分析资料。MM5 主模式的四维同化有两种方案: 分析松弛和站点松弛。

INTERPB 模块把 MM5 主模式的输出从地

形坐标 σ 再插回气压坐标中, 该程序仅仅完成垂直插值和作一些诊断计算, 其输出可以提供给 little_r、INTERPF、GRAPH 和 RIP。

GRAPH 和 RIP 模块用于显示 MM5 中各部分的输出结果。

2 MM5 微物理过程

MM5 微物理过程^[4]可分为显式方案和对流参数化方案, 对流过程是模式的次网格尺度时, 采用对流参数化方案, 当对流过程达到模式的网格尺度时, 采用显式方案。方案选择取决于模式的分辨率。

2.1 对流参数化

对流参数化是将大尺度模式不能显式分辨的对流凝结和对流引起的热量、水份和动量的输送与模式的预报变量联系起来。对流参数化有两方面的作用, 一是大尺度强迫对对流的调节, 一是对流对其环境的反馈, 前者与总降水率的确有关, 后者与云中潜热加热(凝结和蒸发, 冻结和融化, 凝华和升华)的垂直分布以及热量、水份及动量的垂直输送有关。有的对流方案, 对某些天气系统效果比其他方案为佳, 而某些天气系统对对流方案不是很敏感。由大尺度天气系统如气旋、锋面等驱动的对流子系统, 大尺度系统提供必要的强迫以维持对流持续发展, 而对流子系统则被动地随大尺度运动场演变, 对参数化方案的作用不是很明显。而对于大尺度动力热力梯度场较弱、但局地对流能量丰富条件下发展的对流, 不同的参数化方案将会产生不同的物理响应。自上世纪 50 年代末, 已提出多种对流参数化方案。

Anthes-Kuo 对流激发方案是考虑质量、水汽辐合型假设的参数化方案^[4-5]。该方案有几条对流激发标准: 一是气柱内的水汽辐合量 $M_1 > 3.0 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; 二是检查模式探空对流不稳定能量、云的厚度 ($\Delta\sigma \geq 0.3$) 和有效浮力能, 判断是否满足对流发生的条件。该方案产生较多对流性降水, 较少非对流性降水, 给定的加热廓线与相对湿度有关。该方案主要应用于水平分辨率大于 30 km 的模式。

Grell^[6]: 基于准平衡状态或不稳定度, 处理有上升和下沉通量的简单单一云, 补偿性运动动

定加热和加湿廓线。适用于水平分辨率 10~30 km 的模式。

Arakawa-Schubert: 与 Grell 方案不同,能处理多个云体,允许有夹卷进入上升和下沉气流,考虑了切变对降水效率的影响。适用于较大网格(>30 km)。

Fritsch-Chappell: 在松弛时间内去掉 50% 浮力能量, 固定的夹卷率。由于单一云体的假设和局地下沉, 适用于水平分辨率为 20~30 km 的模式。

Kain-Fritsch: 类似于 Fritsch-Chappell,但是采用了复杂的混合云方案, 计算卷入卷出, 并且在松弛时间内去掉所有浮力能量。

Betts-Miller 湿对流调整用的是瞬时平衡假设, 认为由于积云对流的存在, 使模式热力学特征由非平衡态向准平衡热力学参考廓线调整。适用于水平分辨率大于 30 km 的网格。但没有明显的下沉气流, 因而不适于强对流。

浅积云方案处理有较强夹卷和较小半径、没有下沉气流的均匀的非降水性云体。

2.2 显式云物理方案

显式方案将网格尺度降水用显式法计算, 即大气中水汽和水凝物的产生、平流和相互作用等用格点上的预报方程直接计算。当网格尺度太大时, 云体往往只占网格的一部分, 网格平均水汽不饱和, 各种云物理过程无法进行, 所以单独使用对流参数化, 或同时使用对流参数化和显式方案。随着模式水平分辨率的提高, 将复杂详细的云模式加入到中尺度模式中已成为发展趋势。到目前为止, MM5 中共有 5 种显式云物理方案, 从简单的暖雨方案, 简单冰相方案, 到物理过程比较详尽的 Goddard、Reisner 霰方案(见表 1), 预报量也发展到了 9 个。

简单冰相 (Hsie^[7], Dudhia^[8]): 增加了冰相过程, 不需增加内存。没有过冷水存在, 冻结层以下冰晶和雪全部融化成雨水, $T>273.15\text{ K}$ 时, Q_i, Q_s 融化成 Q_c 和 Q_r , MM5 释放的默认显式方案, 计算比较简便, 同时有冰相过程。

混合方案 (Reisner): 可以有过冷水存在, 正温区内允许雪慢慢融化, 冰晶在一时步和一层内

表 1 MM5 模式的显式微物理方案及预报量

显式云物理方案	预报量	数量
Simple ice phase	$Q_v, Q_c, Q_r (Q_i, Q_s)$	3
Mixed ice phase	$Q_v, Q_c, Q_r (Q_i, Q_s)$	5
Goddard	$Q_v, Q_c, Q_r, Q_i, Q_s, Q_g$	6
Reisner 1	$Q_v, Q_c, Q_r, Q_i, Q_s, Q_g, N_i$	7
Reisner2	$Q_v, Q_c, Q_r, Q_i, Q_s, Q_g,$ N_i, N_s, N_g	9
Schultz	$Q_v, Q_c, Q_r, Q_i, Q_s, Q_g$	6

融化完毕。计算中增加了冰晶和雪的变量。在内存和计算时间方面都比 Goddard、Reisner 霰方案有较大优势, 所以许多不以微物理过程为研究重点的数值模拟采用此方案。

Goddard 微物理方案: 增加了霰的预报方程。

Reisner 霰方案^[9]: 在混合方案的基础上增加了冰晶数浓度 (个/L) 和霰的预报。

Schultz 微物理方案^[10]: 是一种高效和简化的物理方案。没有冰晶数浓度的预报。该方案是最晚提出的一种简化的混合相方案, 对业务应用有一定的优势, 因为其物理过程极度简化, 节省计算时间。

Reisner 霰方案是比较详细的微物理方案, 考虑了云水、雨水、冰晶、雪和霰比质量和冰晶、雪和霰数浓度变化, 目前已移植到 MM5 并发布。

第 1、2 方案的物理过程比较简化, 但粒子类型和物理过程都不全面。Goddard、Reisner 霰和 Schultz 方案是 MM5 中物理过程和粒子类型比较多的方案, 都对冰晶、雪、霰和云水、雨水进行了预报计算, Reisner 霰方案是显式方案中唯一对冰晶数浓度进行预报计算的方案, 其它方案则是对粒子的数浓度进行诊断。

随着计算机的发展, 中尺度模式的分辨率不断提高, 我国的 MM5 已经模拟到了 5 km 的水平格距, 国外已模拟到了 2 km 以下。所以将云模式中比较完善的云物理过程耦合到中尺度模式中, 可以增强模式对微物理过程的模拟能力。MM5 中虽有 8 个显式微物理选项, 但增加新物理选项的工作仍在继续。

文章编号: 1006-4354 (2004) 01-0014-04

环流季节变化及其异常的诊断分析

蔡新玲¹, 王盘兴¹, 李 明², 陶建玲²

(1. 南京气象学院, 江苏南京 210044 ; 2. 陕西省气象台, 陕西西安 710015)

摘 要: 介绍了局地型相似系数 (LPAC) 的计算方法。利用 NCEP/NCAR 850 hPa 月平均风场 41 a 再分析资料, 得出多年平均月际局地型相似系数图, 由此分析了环流的季节变化, 并结合长江流域洪涝的 1998 年, 分析了东亚环流季节转换的异常特征。结果表明, 局地型相似系数图能很好地揭示环流的季节变化, 并能反映季节转换的异常。

关键词: 局地型相似系数; 环流; 季节变化

中图分类号: P456.3 **文献标识码:** A

大气环流具有季节变化, 以冬季和夏季环流为 2 个基本态, 它们之间有较大差异。而且, 季节变化在许多区域还具有跳跃性。叶笃正、陶诗言和李麦村^[1]指出大气环流季节变化中存在“6 月突变”和“10 月突变”。曾庆存等^[2]用几个代表经度上的 300 hPa 东西风和 500 hPa 位势高度的

纬度—时间剖面图作了 1981 和 1982 年大气环流的季节变化分析, 发现东亚大陆以东至北美大陆, 以及热带至高纬, 大气环流的变化确有突变性。天气气候的经验表明, 局地环流型 (如风、压系统) 与局地天气气候 (如气温、降水) 的关系应表征环流的要素值 (如风速、气压值) 更密切。当

收稿日期: 2003-08-24

作者简介: 蔡新玲 (1969-), 女, 陕西周至人, 工程师, 主要从事天气预报工作。

参考文献:

[1] 陈 静, 薛纪善, 颜 宏. 物理过程参数化方案对中尺度暴雨数值模拟影响的研究 [J]. 气象学报, 2003, 61 (2): 203-218.

[2] 王鹏云, 阮 征, 康红文. 华南暴雨中云物理过程的数值研究 [J]. 应用气象学报, 2002, 13 (1): 78-87.

[3] 康丽莉, 雷恒池, 肖稳安. 中尺度模式中各种湿物理过程的数值模拟 [J]. 南京气象学院学报, 2003, 26 (2): 76-83.

[4] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5) [Z]. NCAR Technacal Note/NT-398+1. A, 1994: 138.

[5] Anthes R A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model [J]. Mon Wea Rev, 1977, 105: 270-286.

[6] Grell G A. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations [J]. Mon Wea Rev, 1993, 121: 764-787.

[7] Hsie E Y, Farley R D, Orville H D. Numerical simulation of ice phase convective cloud seeding [J]. J Appl Meteor, 1980, 19: 950-977.

[8] Dudhia J. A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front [J]. Mon Wea Rev, 1993, 121: 1493-1513.

[9] Reisner J, Rasmussen R M, Bruintjes R T. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 model [J]. Q J R Metero Soc, 1998, 124: 1071-1107.

[10] Schltz P. An explicit parameterization for operational numerical weather prediction [J]. Mon Wea Rev, 1995, 123: 3331-3343.