

文章编号:1006-7639(2005)-03-0079-06

兰州有限区域中尺度数值模式业务系统及应用

张铁军^{1,2}, 王遂缠¹, 王锡稳^{1,2}, 程 鹏¹, 何祥登³

(1. 兰州中心气象台, 甘肃 兰州 730020; 2. 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020

3. 江西信息应用职业技术学院, 江西 南昌 330043)

摘 要:以国家气象中心数值 T213 资料为基础, 结合业务和服务的实际需要, 建立了基于 MM5 的兰州有限区域中尺度数值模式业务系统, 该系统前后处理程序成熟, 每天都能提供大量的数值预报产品, 已经成为预报业务和服务的重要参考依据, 在精细化预报、暴雨等灾害性天气预报和地质灾害气象等级预报中发挥了重要作用。

关键词:中尺度; 数值模式; 业务系统; 应用

中图分类号: P456.7

文献标识码: A

引 言

中尺度大气数值模式在 20 世纪 70 年代已开始发展, 进入 90 年代, 一些中尺度大气数值模式和模拟系统已相当先进, 并在世界范围广为使用^[1]。最近几年, 随着计算机技术的迅速发展, 一些发达国家的中尺度数值模式和模拟系统已进入实时运行阶段。第五代 Pen State/NCAR 中尺度模式 MM5 是 20 世纪 70 年代由 Anthes 在宾州大学建立的中尺度模式(MM2, MM4)发展来的。MM5 与以前版本相比有了很大的改进, 它主要具有如下特点: (1) 采用非静力平衡动力框架, 对中小尺度天气系统有较强的模拟能力; (2) 多重嵌套网格系统, 满足不同业务科研需要; (3) 考虑了非常详细的物理过程, 对每种物理过程又提供了多种实施方案, 允许根据不同的问题选用不同的方案进行研究; (4) 采用了目前比较先进的 4 维同化(FDDA)处理技术, 可在多种计算平台上运行等^[2]。MM5 已经被公认是高水平的中尺度数值模式, 成为国内外应用相当广泛的一个中尺度数值预报模式。

兰州中心气象台于 2004 年 5 月和中国气象科学院共同引进开发了基于 MM5V3.6 的有限区域中尺度数值模式业务系统, 该系统每天自动运行 2 次, 初始值和边界值均为 T213 资料; 系统前后处理程序系统完备, 每天都能提供大量的数值预报产品,

已经成为预报业务和服务的重要参考依据, 在精细化预报、暴雨等灾害性天气预报和地质灾害气象等级预报中发挥了重要作用。

1 MM5 模式介绍

1.1 MM5V3 模式系统的流程

图 1 是一幅完整的 MM5 系统流程图。从图中可以看出程序的流程次序, 数据的流动等信息。首先, TERRAIN 程序将地形、地面植被资料引入, 将其由经、纬度格点插值到模式网格点上, 网格的投影方式可选择兰勃脱、极射赤面和麦卡脱投影; 然后, 由 REGRID 程序将其它模式(T213、NCEP 等)综合多种要素分析的分析场和预报场资料插值到本模式业务系统的网格点上, 作为本模式的初值场和侧边界值; 而 RAWIN/Little-R 使用了具有连续(循环)扫描功能的 Cressman 和 multiquadric 2 种客观分析方法, 提高插值数据的质量, 我们采用由 9210 网络获取的标准地面和高空观测资料对上述初值场作再分析, 获得较为理想的符合实况的初值场; MM5 是本模式业务系统的核心, 即对由一组描述大气状态的热力动力学方程组求解; 而程序 INTERP 把气压层上的数据转换为 MM5 程序所需要的 sigma 层上的数据。最后预报结果由其他辅助作图及处理程序处理、绘图、显示(如 Micaps, Vis-5D, Grads 等格式)^[3]。

收稿日期: 2005-07-07; 改回日期: 2005-08-01

资助项目: 甘肃省气象局高性能计算机数值模式引进与开发项目《甘肃省中尺度数值预报系统的优化与改进》和甘肃省自然科学基金暨中青年科技基金项目“甘肃省山洪地质灾害气象预报预警系统研究”(3ZSO41-A25-012)共同资助

作者简介: 张铁军(1979-), 男, 甘肃秦安人, 助理工程师, 主要从事中短期天气预报与数值模式研究工作。

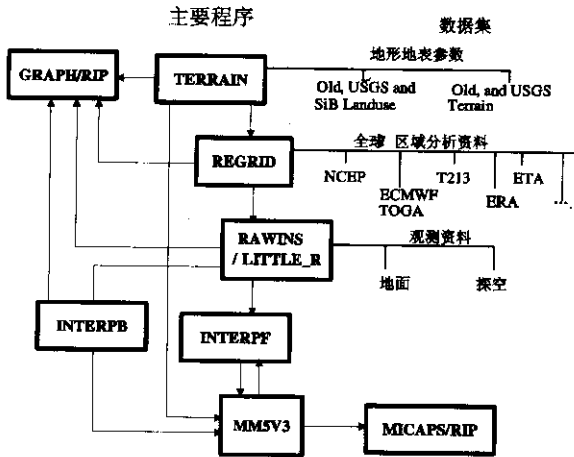


图 1 MM5V3 模式业务系统流程图

Fig. 1 Flow chart of MM5V3 model system

1.2 MM5V3 模式的主要特点

1.2.1 MM5 模式的坐标与网格

MM5 模式采用地形追随坐标, 坐标面 σ 在近地面处与地形走向一致, 向高层逐渐平缓, σ 定义为

$$\sigma = (P - P_t) / (P_s - P_t) \quad (1)$$

其中 P 为气压, P_t 为模式顶气压, P_s 为地面气压。

MM5 中为非静力平衡过程, 上述 σ 中的气压均为参考态值, σ 值在最下层贴近地面处 ($P = P_s$) 为 1, 在模式顶 ($P = P_t$) 为 0。垂直层次的选择可根据需要选取, 如果预报对象在近地面处, 则将下面的 σ 层选得密一些, 以提高其分辨率。

模式的水平网格为 Arakawa-Lamb B 交叉网格, 在这样的网格上分为 \cdot 点和 \times 点 2 种格点, u, v 速度分量定义在 \cdot 点上, 其它量 (T, q 等) 定义在 \times 点上, 由 REGRID 和 RAWINS/Little-R 读入的经纬度上的资料需分别插值到模式的 \cdot 和 \times 点上。

1.2.2 嵌套

MM5 具有多重嵌套网格功能, 最多可有 9 个相互作用区域同时运行。对于双向嵌套, 子网格格距为其母网格格距的 1/3。双向作用是指子网格不仅由其母网格提供侧边界, 还在整个子网格范围内对母网格有反馈作用。子网格还允许互相重迭, 子网格可按指定时间打开或关闭, 还可按指定方向移动。

MM5 也可以单向嵌套。即粗网格先运行, 运行完后再将其输出结果插值到细网格点上, 为其提供初值和侧边界值, 再运行细网格, 在这种情况下, 对粗细网格格距没有比例要求。细网格结果不反馈到粗网格。

1.2.3 侧边条件

运行任何区域数值天气预报模式都需要侧边界条件。MM5 模式要求提供侧边界上的水平风、温度、气压、湿度 4 个要素场。在条件允许时还可提供微物理场 (如云)。因此在运行模式之前必须先准备好初值场和侧边界等资料。

侧边界可由对未来时刻的分析, 或事先运行的粗网格模拟, 或其它模式的实时预报提供。对实时预报须用全球模式预报 (如 T213) 提供。在计算历史个例时, 提供边界条件的分析数据可以通过测站分析 (RAWINS 和 little_R) 来提供。

1.2.4 静力平衡与非静力平衡

MM5 以前版本的 Penn State/NCAR 的中尺度模式曾使用静力模式, 这是因为中尺度模式中典型的水平格点大小与特征的垂直厚度相当或比它更大。因此, 可以使用静力假定而且气压完全可以由其上的空气柱决定。随着模式水平分辨率不断提高, 当水平格距等于或小于垂直方向的尺度时, 静力平衡假定不再成立, 需要用非静力平衡的动力学方程组。垂直加速度对垂直方向气压梯度的贡献导致的非静力平衡是非静力平衡动力学中的唯一附加项。它将对垂直的气压梯度有影响从而使得静力平衡不再被准确地满足。所以, 一旦水平格距等于或小于垂直方向的尺度时, 就应该采用非静力平衡的动力学方程组。

1.2.5 非静力模式中的参考态

参考态是处于静力平衡的理想温度廓线, 由下面方程表示: $T_0 = T_{s0} + A \ln(P_0/P_{00})$ (2)

$T_0(P_0)$ 由 3 个常数决定: P_{00} 为海平面气压, 取为 10^5 Pa, T_{s0} 为在 P_{00} 处的参考温度, A 为温度递减率。这几个常数都在 INTERP 中指定。通常 T_{s0} 根据模拟预报范围内一次典型探空观测选定。在 $T - \ln P$ 图上参考廓线为直线。 T 可按 10 K 之差选择 (如在极地、中纬度冬季、中纬度夏季、热带分别选为 270、280、290、300 K)。参考廓线选得好能减少气压梯度计算误差。

地面参考气压由地形高度决定, 引入静力平衡关系^[1], 由 (2) 式可得:

$$Z = -\frac{RA}{2g} \left(\ln \frac{P_0}{P_{00}} \right)^2 - \frac{RT_{s0}}{g} \left(\ln \frac{P_0}{P_{00}} \right) \quad (3)$$

在这个二次方程中只要给定地形高度 Z , 就可以得到地面气压 P_{01} , 模式 σ 层的高度可由下式确定:

$$P_0 = P_{s0} \sigma + P_{top} \quad (4)$$

$$P_{s0} = P_{01} - P_{top} \quad (5)$$

由于参考态与时间无关,因而 σ 的高度值也不随时间变化。所以给定格点上的高度是常数。

为了能更好地近似描述平流层,参考态在顶层包含了一个等温层。它由一个单独的附加温度来定义,此温度作为基态温度的更低界线。使用它可以有效地提高模式顶的高度。

1.2.6 4 维资料同化(FDDA)

4 维资料同化旨在使模式运行向观测或分析场逼近,经过 4 维资料同化处理后,其结果既与观测或分析最为接近,又满足动力热力平衡关系。这样处理要优于仅在某个时次使用分析数据做初始化处理。因为在某段时间内加入数据能够有效地增加数据的密度,同时测站数据的影响可由模式带往下游,帮助填补其后时间的资料空缺。

FDDA 可用于动力初始化和产生 4 维资料集。动力初始化是在模式起报前一段时间将更多资料引入以获得最佳初始场资料。与由初始时刻的分析提供的静态初始化相比较可以发现,所加入的数据对于预报很有用处。第二种应用即产生 4 维同化数据集,是一种产生动力平衡分析的方法。它的目的是获得与观测或分析场接近而又满足动力热力平衡的一组理想资料以供进一步分析。

根据数据是格点数据还是单独的测站数据,MM5 有 2 种 FDDA 方案,分析场逼近或站点资料逼近,前者须有格点分析场资料与模式预报比较,后者不具有所有格点的分析场而是某些站点观测资料或非常规资料如风廓线、雷达资料等。每个格点可能同时受几个站点或格点资料影响,以它们由距格点的距离远近(时、空距离)为权重决定其影响的大小。

1.2.7 地表植被类型

MM5 模式中包含有 3 个地表植被资料文件,分别按 12、16 和 24 类划分植被种类,每个格点元被模式赋予了其中的一种类型,以确定地面的属性比如反照率,粗糙度,长波发射率,热容量和水汽有效率等。此外如具备雪覆盖资料,地表性质要作适当修正,这些参数值分为冬、夏 2 组。其资料都是气候平均值,而这些陆地类型和地形高度在 TERRAIN 程序中被赋值。对个例一般不需做调整。

Oregon 州立大学/NCEP Eta 在 MM5 模式中引入的地表模式(LSM)要求增强模式系统以允许额外的输入和输出。为了能处理 LSM,MM5 需要几个额外的输入场。Terrain 程序提供了一个已调整到模式

地形高度上的年平均地面温度,一个每月气候学上的植被组成以及每个格点单元内主要的土壤类型和植被类型。

1.2.8 地图投影和地图尺度因子

地图投影方式按模拟预报量所在纬度分为:兰勃脱投影适用于中纬度地区,极射赤面投影适用于高纬度地区,麦卡脱投影适用于低纬度地区。在兰勃脱投影的地图上,模式的 x 、 y 坐标轴并不是东西和南北方向。由观测站得到的 u 、 v 分量须旋转一个适当的角度才能变成模式格点上的 u 、 v 分量,同样,由模式预报的 u 、 v 分量与站点测风比较时也必须作旋转转换,这将在模式的预处理和后处理中完成。地图尺度因子定义为:

$$m = (\text{格点距}) / (\text{地球上的实际距离})$$

m 值随纬度而变。在模式方程组水平梯度计算中含有 m 。

它的值接近于 1 且通常是随纬度而变化的。模式中的投影能保持小区域的形状,因而在任何地方 $dx = dy$ 。但是格点长度在穿越区域时会发生变化,这样可以显示行星的半球面。当需要用到水平梯度时,地图比例因子必须在模式方程中加以考虑。

1.3 MM5V3 模式各模块功能简介

1.3.1 TERRAIN

TERRAIN 是 MM5 模式业务系统中的第一个程序,属于系统运行的准备部分,完成模式所需要的地形处理。指定模拟预报范围(中心,格距,格点数,经纬度),为中尺度模式域产生地图背景;把按经纬度规则分布的地形高度和植被组成水平插值(或分析)到所选择的多重嵌套的中尺度区域上。如果在 MM5 模式中使用了地表模式(LSM),则额外的场,比如土壤类型,植被组成,以及深层土壤温度也将会被产生。

1.3.2 REGRID

REGRID 的目的是读取气压层上的气象分析资料,并把分析数据从原有的格点和地图投影上插值到由 MM5 的预处理程序 TERRAIN 定义的格点和地图投影上。读入其它模式如 T213 格点资料(从地面到模式顶各规定等压面上),作为客观分析的初猜场和侧边界值。

1.3.3 RAWINS/Little_R

读入初始时刻标准格式的观测地面和探空资料,通过客观分析、质量控制等过程将其分析到中尺度网格点上,对初猜场进行订正,生成等压面上正

方形网格的初值。

1.3.4 INTERPF

初始化。处理从分析程序到中尺度模式的数据变换,进行垂直内插、诊断量计算和数据重新格式化。把 P 面上的分析值内插到 σ 面上,并计算扰动气压,垂直速度初值,为 MM5 主模式提供初始场及侧边界。

1.3.5 MM5

MM5 是整个模式业务系统中的数值天气预报部分,逐步积分产生数值预报结果。

1.3.6 INTERPB

σ 坐标转换及诊断。模式积分的输出是在 σ 面上,需要按初值化中的插值方法回插到等 P 面上,同时在 P 面和 σ 面上进行诊断分析。处理从中尺度模式返回到气压层面所需的数据变换。只处理垂直内插和少数诊断量。

1.3.7 RIP/GRAPH

RIP/GRAPH:中尺度模式业务系统绘图程序。

1.4 模式主要物理过程

模式对主要物理过程作参数化处理,其中包括:湿物理过程、次网格水平扩散方案、边界层方案、辐射物理过程、参数化方案等。侧边界采用时变双向流动边界等等。

MM5 中湿物理过程主要有 2 类:一类是隐式处理,即积云参数化方案;另一类是显式处理云水、雨水、云冰和雪。在隐式的积云参数化方案中,除了与 MM4 中相同的 Anthes — Kuo 方案外,另外又增加了两种:一种是改进的 Arakawa — Schu — bert 方案,这是在原来的 Arakawa — Schubert 方案中增加了下沉气流的影响;另一种是 Grell 方案,该方案中把云看作由上升气流和下沉气流形成的 2 个定常环流,云气和环境空气之间只在环流的顶部和底部有混合交换。

在显式方案中,增加了冰相过程,即除了水汽、云水、雨水之外,增加了云冰和雪 2 种水生成物。具体处理方式上又分为 2 种方案:其一为简单的水相或冰相单独存在方案,其二为冰、水相混合存在方案^[4]。

2 兰州有限区域中尺度数值模式业务系统

2.1 运行环境

采用 SGI Altix 3700 高性能计算机作为运行平台,SGI Altix 3700 高性能计算机用了 SGI 的 NUMAflex 体系结构和 64 位 Linux 操作系统,配备 20

个 1.3 GHz 英特尔 Madison 处理器,具有 48 GB 共享内存。系统每天并行运行 2 次,每次主模式大概用 1 h 20 min。

2.2 模式业务系统的设计

模式采用 3 重嵌套方式,模式中心点为 100°E 、 39°N ,粗网格区域格距为 45 km,格点数为 133×133 ;细网格区域格距为 15 km,格点数为 151×151 ;更细网格区域格距为 5 km,格点数为 151×151 ;垂直方向为 σ 坐标,模拟中取 σ 为不等距的 23 层(图 2)。

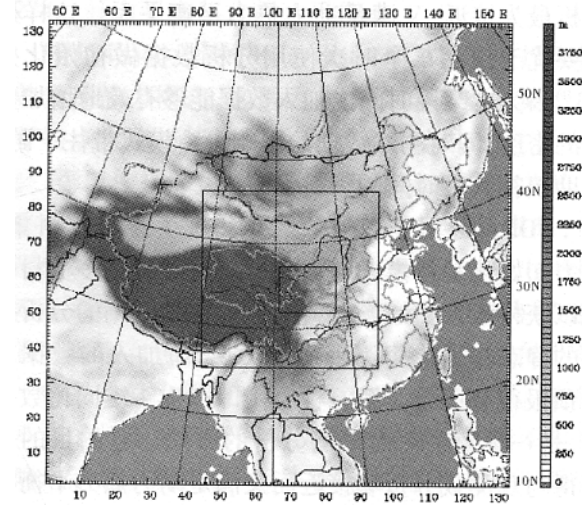


图 2 模式区域与地形图

Fig. 2 The model region and topographic chart

2.3 MM5 的主要参数

(1)湿物理过程:采用 Mixed — Phase 方案。

(2)积云对流参数化:最外层粗网格和中间层细网格选用 Grell — Grell 方案,最内层细网格没有选择积云对流参数化。Gren 方案^[5]提出了一个简单的概念模型,即云内有 2 支分别由上升和下沉运动引起的稳定状态的环流,除了在环流的顶部和底部外,云内空气与环境场之间没有直接的混合。在该方案中,积云对流对大尺度环境场的反馈作用完全由补偿的质量通量及云顶和云底的卷出效应决定。

(3)行星边界层方案:采用 MRF 行星边界层参数化方案。

(4)大气辐射方案:采用云辐射处理方案,考虑云对辐射造成的影响。大气辐射传输过程是气象中的重要物理过程,它的结果将改变大气中的热力状况,进而改变动力结构。通常地,大气辐射传输过程包括晴空辐射传输和云的辐射传输 2 个部分,其中的难点是云 — 辐射相互作用,它通过辐射 — 对流机制来改变动力结构。该方案较复杂,它涉及长短波

与显云和晴空之间的相互作用。该方案除了提供地面辐射通量外,也提供大气温度的倾向变化。该方案也许计算代价比较大,但是几乎没有什么内存需求。

2.4 模式业务系统的前处理

本模式业务系统使用 T213 资料做初始化分析中的初始猜测场和模式的侧边界条件。利用文件调取程序 ftpget.exe 文件,从 9210 网络服务器中直接获取从地面到 100 hPa 各标准等压面上的 T213 资料,并按照旬为目录存放,方便业务系统使用及个例研究。然后对 T213 资料进行插值处理形成每间隔 6 h 的风场(u, v)、湿度(q)、温度(T)和海平面气压(PS)的预报场作为模式的边界条件。

另外,ftpget.exe 文件从 9210 网络服务器中收取国家气象局下发的地面和探空气象资料。地面报和探空报经过报文分解后,得到各标准等压面上的位势高度、温度、露点、风向和风速。

2.5 模式业务系统的后处理

在模式积分计算完毕后,模式将在 σ 面上的资料回插到等压面上,形成预报产品的数据包 MMOUTDOMAIN1、MMOUTDOMAIN2 和 MMOUTDOMAIN3;然后利用 MM5 自带绘图软件 RIP,绘制高度场、温度场及雨量图;利用 tomicaps 程序将模式结果转为全国气象部门通用的 MICAPS 格式;另外也可以将结果转为 Grads 格式和 Vis-5D 格式。

2.6 模式产品及发布

MICAPS 系统是完成预报不可缺少的工具,为了能够使预报人员方便使用和调阅模式产品,tomicaps.exe 程序可以根据需要转化 MM5 或 INTERPB 输出的 2 维/3 维数据,但因为 MICAPS 格式为 ASCII 码,占用空间大,也不合适网络传输,通过修改 tomicaps para 的变量名及其层次,可以只输出用户经常关心的数据。目前系统输出的 MICAPS 格式的数据有 MM5 格点、经纬格点或站点 3 种格式的数据,主要的产品有累计降水;1 h、3 h、6 h、12 h、24 h 降水;高、中、低总云量。考虑业务的要求,转换程序增加了几个变量:可以输出风速的大小和流场。

利用 Web 技术,建立了以发布数值预报产品为主的指导预报网,在网站上每天发布最新的数值模式产品,包括西北地区 400 多个县级气象台站的精细化预报及 3 种网格的 1 h、3 h、6 h、12 h 降水量图片;100 hPa、300 hPa、500 hPa、700 hPa、850 hPa 高度场、温度场及风场图片。

3 个例运行

3.1 暴雨预报

2004 年 8 月 19 日,甘肃省出现了一次入汛以来最强的降水,共计有 13 个站出现暴雨,有 21 个站出现大雨或大到暴雨(图 3)。这次区域性暴雨过程是甘肃省自 1981 年以来最强的一次,近 50 a 来,也仅有 1970 年 8 月 29 日(18 站暴雨)和 1981 年 7 月 13 日(15 站暴雨)降水强于这次。

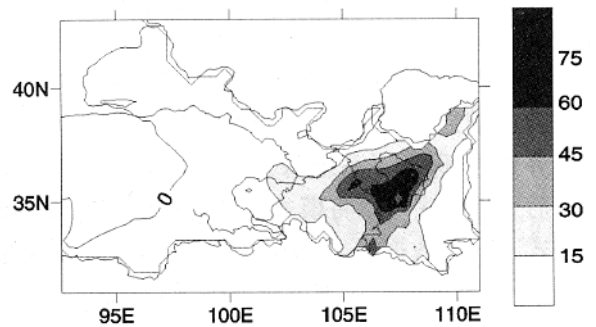


图 3 2004 年 8 月 19 日 08:00~20 日 08:00 西北地区东部降水实况(单位:mm)

Fig. 3 The precipitation in the east of Northwest China from 08:00 on 19 to 08:00 on 20 August 2004 (unit: mm)

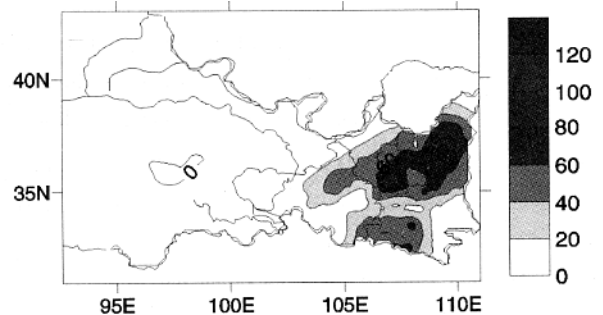


图 4 2004 年 8 月 19 日 08 时预报 19 日 08:00 至 20 日 08:00 西北地区东部降水(单位:mm)

Fig. 4 Precipitation forecasting from 08:00 on 19 to 08:00 on 20 August 2004 in the east of Northwest China (unit: mm)

从降水预报看(图 4),24 h 降水量预报,雨带、雨量位置基本是准确描述,量级偏大,特别是在陕西一带,并没有出现和预报对应的强降水,在甘肃境内的降水预报较为准确。

3.2 地质灾害预报

地质灾害的发生与当日的强降水有很直接的关系^[4],数值模式雨量产品是制作地质灾害等级预报的主要依据。2004 年 8 月 19 日,综合考虑了兰州有限区域中尺度数值模式业务系统的预报结果,利

用地质灾害等级预报的系统,制作并发布了甘肃省定西、临夏、陇南、天水、平凉、庆阳等市州有 3 级地质灾害的预报。灾情显示,在平凉的华亭、庆阳的华池、崇信等县出现了地基塌陷,房屋被毁,山体裂缝,道路被毁等地质灾害。

4 小 结

(1) 兰州有限区域中尺度数值模式业务系统是基于 MM5 的中尺度数值预报系统, MM5 是目前国内外广泛应用的中尺度数值模式, MM5 具有技术成熟可靠,稳定性好的特点,适合用于业务和研究。

(2) 兰州有限区域中尺度数值模式业务系统具有完备的前后处理能力,用 T213 资料作为初始场和边界条件,保证了系统每天的正常运行。同时强大的后处理程序可以将模式结果处理成 MICAPS 数据格式、Grads 数据格式、Vis-5D 数据格式及大

量图片文件,系统完全能满足业务科研的要求。

(3) 该系统经过 1a 多的业务运行,系统运行稳定,系统提供的数值预报产品对中尺度及系统性降水均有较好的预报能力,对预报业务及服务有参考价值,在精细化预报、暴雨等灾害性天气预报和地质灾害气象等级预报中发挥了重要作用。

参考文献:

- [1] 程麟生. 中尺度大气数值模式发展现状和应用前景[J]. 高原气象, 1998, 18(3): 351-354.
- [2] PSU/NCAR. MMS Modeling System Version 3, Mesoscale and Microscale Meteorology Division National Center for Atmospheric Research [Z]. 2001. 1-5.
- [3] 周小珊, 杨森, 张立祥. 中尺度数值模式(MM5v3)在沈阳区域气象中心的试用[J]. 气象, 2001, 27(8): 28-32.
- [4] 王鹏云. 新一代 Penn State/NCAR 中尺度数值模式 MM5[J]. 气象科技, 1995, (2): 32-35.
- [5] 王锡稳, 张铁军, 冯军, 等. 甘肃地质灾害气象等级预报研究[J]. 干旱气象, 2004, 22(1): 9-11.

The Operational System of Lanzhou Limited Area Mesoscale Numerical Prediction Model and its Application

ZHANG Tie-jun^{1,2}, WANG Sui-chan¹, WANG Xi-wen^{1,2}, CHENG Peng¹, HE Xiang-deng³

(1. Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020, China;

2. Key Laboratory of Arid Climatic and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China;

3. Jiangxi Vocational Technology College of Information Application, Nanchang 330043, China)

Abstracts: Based on the T213 materials of National Meteorological Center and an actual need of the operation and service, the operational system of Lanzhou limited area mesoscale numerical prediction model based on MM5 has been set up. A large number of forecasting products are acquired from the system everyday, which have already become the important benchmark for forecasting operation and service, and play more and more important role in elaborate prediction, extreme weather event prediction (for example, the torrential rain) and the meteorological geological calamity prediction, etc.

Key words: mesoscale; numerical model; operational system; application