

GRAPES 模式标准初始化方案设计与实现*

黄丽萍 伍湘君 金之雁

(中国气象科学研究院,北京 100081)

摘 要

文章介绍了 GRAPES 模式标准初始化系统的方案设计及程序结构,对 3 种不同方案产生的初始场进行了分析。结果表明:水平风场、温度场、位温场对插值方法的精度并不是很敏感,而高度场以及气压 Exner 函数则对垂直插值方法的精度要求很高;在 3 种模式变量产生方案中,方案一的效果较差,但它计算速度快,在地形梯度不大的地方可以选择使用;方案二与方案三的效果则比较好,用户可根据自己的需求任意选择。GRAPES 模式标准初始化系统在完成其主要功能的同时,通过灵活的程序设计,对标准初始化系统的区域、分辨率、垂直层次、水平插值方法、垂直插值方法等的任意选取,使得标准初始化系统可以很容易满足模式初值的各种需求,为模式开发研究实验提供了各种便利。

关键词:三次样条 插值方法 模式初值

引 言

GRAPES(Global and Regional Assimilation Prediction Enhanced System)模式^①标准初始化 SI(Standard Initialization)系统主要用于将分析场资料或粗网格模式资料处理成模式运行所必需的模式格点上的初始场及侧边界。由于数值预报是大气运动控制方程的初值问题,初始场质量的好坏直接影响到模式的预报结果,初始场的微小差别都可能导致截然不同的模式预报结果^[1-4]。因此需要设计一个标准初始化系统,它应尽可能精确地将所得到的各种信息加工处理成模式所必需的初始场,并尽可能地反映真实大气的系统状况。由于每个模式都有其自身的特性,不同的模式有不同的预报变量、不同的垂直坐标等,所以必然需要适应模式特性的标准初始化系统。国外一些知名的数值预报模式如 MM5^[5]、ARPS^[6]都有其自身的标准初始化系统,但大多数初始化系统采用的是比较简单的插值方案,如水平方向采用双线性插值方案,垂直方向采用高度线性插值或气压线性插值等;美国最近发展的 WRF^[7]标准初始化方案也基本上沿用了 MM5、ARPS 的方案。GRAPES 模式初始化系统在设计之初也尝试使用 WRF SI 方案,但在某些天气个例中出现过模式积分不稳定现象,因此有必要设计一个针对 GRAPES 模式的 SI 方案,它能够通过较高精度的水平及垂直插值方法,科学合理的物理方案设计来为 GRAPES 模式提供一

* “十五”国家重点科技攻关计划项目“中国气象数值预报技术创新研究”(2001BA607B)和国家重点基金项目“中国强降水天气数值预报有关科学问题的研究”(F-D0508)共同资助。

2004-01-14 收到,2004-04-14 收到修改稿。

① 陈德辉主持撰写,新一代多尺度数值预报系统(区域)技术手册(内部交流)。

一个好的初始场。

1 GRAPES 模式的预报变量及垂直坐标

1.1 模式的预报变量

GRAPES 模式考虑到位温 θ 的保守属性,以位温 θ 代替方程中的温度:

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R_d}{C_p}} \quad (1)$$

同时引入气压 Exner 函数 Π :

$$\Pi = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{R_d}{C_p}} \quad (2)$$

其中, p_0 为 1000 hPa, R_d 为干空气比气体常数, C_p 为干空气定压比热。静力平衡方程

$$\frac{\partial \ln p}{\partial z} = - \frac{g}{RT} \quad (3)$$

改写为

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z} = - \frac{g}{C_p \theta} \quad (4)$$

为确保计算的稳定性,提高计算精度,GRAPES 引进“参考大气”基本状态。令 $\tilde{\Pi}$ 、 $\tilde{\theta}$ 分别为参考大气基本状态廓线, Π' 、 θ' 表示偏离参考大气状态的扰动量,则:

$$\Pi = \tilde{\Pi} + \Pi' \quad (5)$$

$$\theta = \tilde{\theta} + \theta' \quad (6)$$

这样 GRAPES 模式的预报变量就包括 u 、 v 、 w 、 θ' 、 Π' 、 q 共 6 个变量,其中 q 可根据物理过程参数化的选择确定水物质的种类个数。

1.2 参考大气表达式

GRAPES 模式中假定参考大气为等温大气,即: $\tilde{T} = T_0 = \text{常数}$ 。

根据静力方程(3)可得:

$$\ln \left| \frac{p}{p_0} \right| = - \frac{gz}{RT_0} \quad (7)$$

由式(1)、(2)及(7)可得:

$$\tilde{\Pi} = e^{\left| - \frac{gz}{C_p T_0} \right|}$$

$$\tilde{\theta} = T_0 / \tilde{\Pi} = T_0 e^{\left| \frac{gz}{C_p T_0} \right|}$$

这样,在大气温度为常数 $T = T_0$ 的假定下,参考大气表达为

$$\tilde{\Pi} = e^{- \frac{gz}{C_p T_0}}$$

$$\tilde{\theta} = T_0 e^{\frac{gz}{C_p T_0}} \quad (8)$$

1.3 参考大气及其偏差的静力关系

绝大多数非静力模式通常假定参考大气满足静力平衡条件,即:

$$\frac{\partial \tilde{\Pi}}{\partial z} = - \frac{g}{C_p \tilde{\theta}} \quad (9)$$

用式(4) - (9),则得到 Π 和 θ 满足的静力关系为:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z} = \frac{g\theta'}{C_p(\theta + \theta')\theta} \tag{10}$$

1.4 模式的垂直坐标

GRAPES 模式采用高度地形追随坐标:

$$\hat{z} = Z_T \frac{z - Z_s(x, y)}{Z_T - Z_s(x, y)}$$

其中, Z_s 和 Z_T 分别为地形高度和模式层顶高度, z 为高度场。

在模式坐标面参考大气表达式(8)及静力平衡关系式(9) (10)表示为:

$$\tilde{\Pi} = e^{-\frac{g(Z_T - Z_s)\hat{z} + Z_T Z_s}{C_p T_0 Z_T}} \tag{11}$$

$$\tilde{\theta} = T_0 e^{\frac{g(Z_T - Z_s)\hat{z} + Z_T Z_s}{C_p T_0 Z_T}} \tag{12}$$

$$\frac{\partial \tilde{\Pi}}{\partial \hat{z}} = -\frac{Z_T - Z_s}{Z_T} \cdot \frac{g}{C_p \tilde{\theta}} \tag{13}$$

$$\frac{\partial \Pi'}{\partial \hat{z}} = \frac{Z_T - Z_s}{Z_T} \cdot \frac{g\theta'}{C_p(\theta + \theta')\theta} \tag{14}$$

1.5 模式变量垂直分布

GRAPES 模式变量垂直方向采用 Charney Philips 跳层分布,图 1 给出了模式变量垂直分布图:

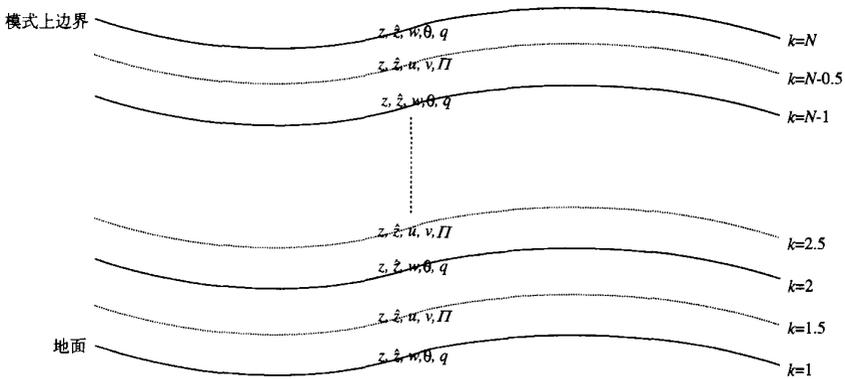


图1 GRAPES 模式变量垂直分布图

2 GRAPES 模式标准初始化系统结构及模式变量产生方案

图 2 给出了 GRAPES 模式标准初始化系统的结构图,它通过 3 个主要模块完成其主要功能:静态资料准备、模式变量的水平插值及垂直插值。其中,用户可选择粗网格模式产品以及 GRAPES 同化分析结果作为处理的初始资料,水平插值和垂直插值有多种插值

方案可供用户选择。

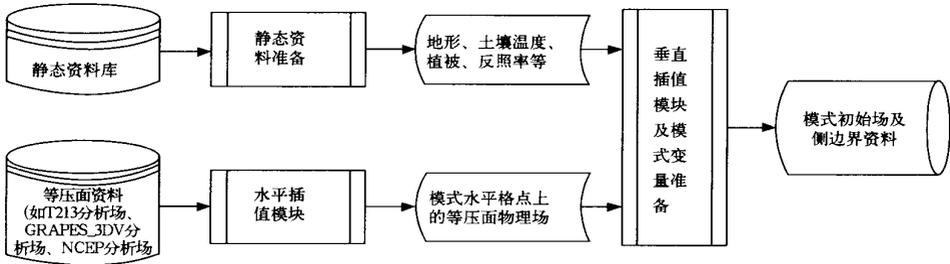


图2 GRAPES 模式标准初始化系统结构图

2.1 静态资料准备

考虑到未来预报模式的需求,SI 在设计上允许用户可任意控制其所需的预报区域。这主要通过控制文件中的空间参数(起始经纬度、水平维数及水平分辨率)来确定标准初始化的区域,从高分辨率全球静态资料库中读出数据并根据需要进行水平插值、地形平滑等,从而得到模式格点上的静态资料,包括地形高度、经度、纬度、陆面参数、土壤类型、植被信息等等。其中用到的全球静态资料库中地形、土壤类型(soil type)、土地利用(land use)的分辨率为 $30''$,植被分辨率为 $10'$,深层土壤温度分辨率为 1° 。由于静态资料只取决于空间参数而与时间参数无关,所以这部分程序不需要每次都调用它。一旦确定了模式预报区域,用户只需在第1次运行整个标准初始化程序时执行一次静态资料程序,产生这个区域的静态资料,在以后运行标准初始化程序时只需读入静态资料,而不需再次执行静态资料程序,从而使整个标准初始化程序能够高效运行。

2.2 水平插值和垂直插值

水平插值模块用于将等压面的分析场资料或粗网格模式资料水平插值到 GRAPES 模式水平格点上。SI 中提供了邻近格点的值、4 点双线性插值以及 16 点插值 3 种插值方法可供选择。

垂直插值则将水平插值后的三维变量场垂直插值到 GRAPES 模式垂直坐标面上,即将资料由等压面转换到高度面上。采用的垂直插值方法有简单高度线性插值、拉格朗日插值及三次样条插值 3 种方法可供选择。

2.3 模式变量产生方案

由于 GRAPES 模式为非静力模式,垂直速度作为其预报量之一,为避免模式积分开始垂直速度增长太快,造成模式运行不稳定,SI 中假定初始时刻垂直速度为 0,即初始场温压场满足静力平衡关系。围绕此出发点,我们在标准初始化系统中设计了如下 3 种模式变量产生方案:

(1) 方案一

①利用公式 $\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R/c_p}$, 由等压面上 $(T, p)_p$ 求出 $(\theta)_p$, 这里下标 p 表示在等压面上,下同。②将等压面上的 $(\theta, u, v, q)_p$ 垂直插值到模式面上的 $(\theta, u, v, q)_{\hat{z}}$, 采用高度线性垂直插值,这里下标 \hat{z} 表示模式面上,下同。③利用静力平衡关系式(4),从模式低

层到高层垂直静力积分,求出模式面上的 $(\Pi)_{\tilde{z}}$ 。④利用式(6),由模式面的 $(\theta, \theta)_{\tilde{z}}$ 求出模式面上的 $(\theta')_{\tilde{z}}$,其中 θ 根据式(12)来计算。⑤利用静力平衡关系式(13),从模式低层到高层垂直静力积分,求出模式面上的 $(\Pi)_{\tilde{z}}$ 。⑥利用式(5),由模式面的 $(\Pi, \Pi)_{\tilde{z}}$ 求出模式面的 $(\Pi')_{\tilde{z}}$ 。

(2) 方案二

在具有收敛性及稳定性的插值函数中,最常用和最重要的是样条插值函数,它是一个整体上具有二阶连续微商的插值函数,且由于用样条插值函数给出的插值曲线或曲面足够光滑,运用时计算简单,能满足一般实际问题的要求,是数据逼近、数值微积分、微分方程数值解等计算数学领域中重要的工具^[8]。在方案二及方案三中的垂直插值问题我们都选用的是样条插值方法。

①将等压面上的 $(H, p)_p$ 垂直插值得到模式面上的 $(p, p_w)_{\tilde{z}}$,采用三次样条垂直插值方法,其中 H 表示高度场, p_w 表示模式半层气压。②将等压面上的 $(T, u, v)_p$ 垂直插值得到 $(T, u, v)_{\tilde{z}}$,采用三次样条垂直插值方法;将等压面上的 $(q)_p$ 垂直插值得到 $(q)_{\tilde{z}}$,采用高度线性垂直插值方法。③利用式(1),由 $(T, p)_{\tilde{z}}$ 计算出 $(\theta)_{\tilde{z}}$ 。④利用静力平衡关系式(4),从模式低层到高层垂直静力积分,由 $(\theta)_{\tilde{z}}$ 求出模式面上的 $(\Pi)_{\tilde{z}}$ 。⑤利用式(6),由模式面的 $(\theta, \theta)_{\tilde{z}}$ 求出模式面上的 $(\theta')_{\tilde{z}}$,其中 θ 根据式(12)来计算。⑥利用静力平衡关系式(13),从模式低层到高层垂直静力积分,求出模式面上的 $(\Pi)_{\tilde{z}}$ 。⑦利用式(5),由模式面的 $(\Pi, \Pi)_{\tilde{z}}$ 求出模式面的 $(\Pi')_{\tilde{z}}$ 。

(3) 方案三

①将等压面上的 $(H, p)_p$ 垂直插值得到模式面上的 $(p, p_w)_{\tilde{z}}$,采用三次样条垂直插值方法,其中 H 表示高度场, p_w 表示模式半层气压。接着利用公式 $\Pi = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{R/C_p}$,由模式面的 $(p)_{\tilde{z}}$ 气压计算出模式面的 $(\Pi)_{\tilde{z}}$ 。②将等压面上的 $(T, u, v)_p$ 垂直插值得到 $(T, u, v)_{\tilde{z}}$,采用三次样条垂直插值方法;将等压面上的 $(q)_p$ 垂直插值得到 $(q)_{\tilde{z}}$,采用高度线性垂直插值方法。③利用式(11)、(12),计算 $(\theta, \Pi)_{\tilde{z}}$ 。④利用式(5),由模式面的 $(\Pi, \Pi)_{\tilde{z}}$ 求出模式面的 $(\Pi')_{\tilde{z}}$ 。⑤根据静力平衡关系式(14),由 $(\Pi')_{\tilde{z}}$ 垂直静力插值得到 $(\theta')_{\tilde{z}}$ 。

3 GRAPES 模式标准初始化系统各种方案效果比较

3种方案水平方向均采用双线性插值,模式水平分辨率均为60 km,相同的模式区域,模式垂直方向采用等间距分层,共为17层,模式层顶为25000 m,模式的背景场由国家气象中心中期预报模式T213的分析场提供。

总的来说,3种方案计算出来的模式初始变量场 u, v, q 以及 θ 差别不是很明显(图略),变量场 θ 在个别层次差别有时能达到4 K,但基本上系统结构的分布仍很相似,只是中心强度有所不同。这说明变量场 u, v, q 以及 θ 对插值方法以及变量导出方案并不是很敏感。

但对于变量场 Π ,情况则大不相同。图3及图4分别为3种方案产生的模式低层及模式高层初始 Π 场,可以看出,在模式低层(大约5150 m),3种方案产生的初始场没有很大的差别, Π 场受地形的影响,与地形结构非常相似,尤其是方案二与方案三产生的初始 Π ,差别非常细微,方案一与另外两个方案的结果稍有差别,这种差别完全是线性插值精

度与三次样条插值精度的差别造成的；而在模式高层(大约 20000 m)，方案一产生的初始 Π 与其余两种方案的差别很大，方案一的结果明显很差，在地形梯度较大的地方产生了很多虚假的扰动，且在模式高层，仍能很明显地看出地形的影响，这样的初始场令人很难相信其正确性。而方案二、方案三的模式高层初始场 Π 看起来要好得多，其结果只受地形的影响，整场看起来非常平滑。总体来看，方案三 Π 场值比方案二的值要大，这是由方案

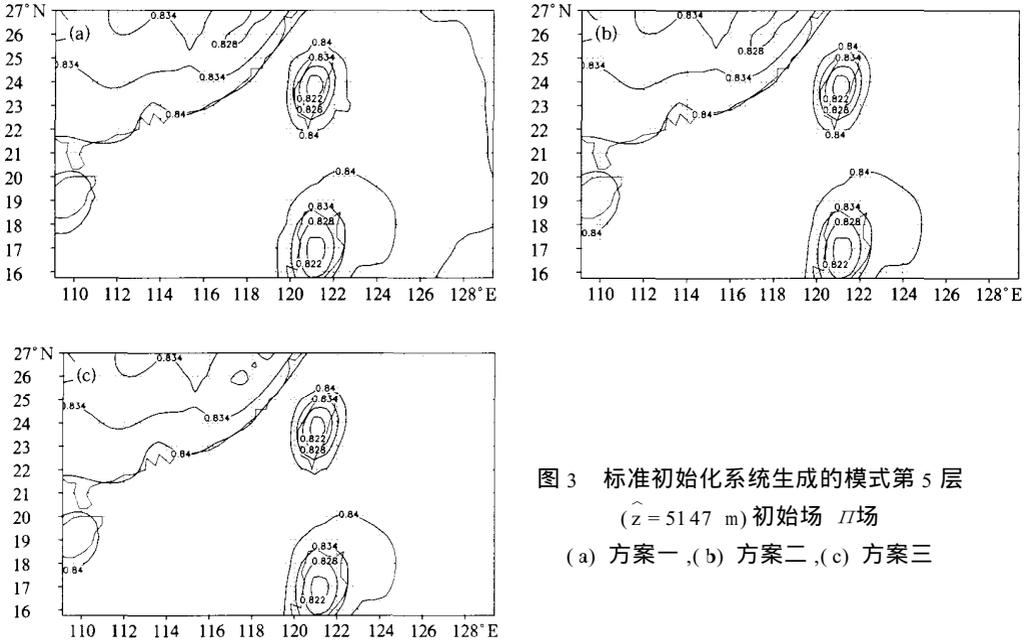


图 3 标准初始化系统生成的模式第 5 层 ($\hat{z} = 5147 \text{ m}$) 初始场 Π 场
(a) 方案一, (b) 方案二, (c) 方案三

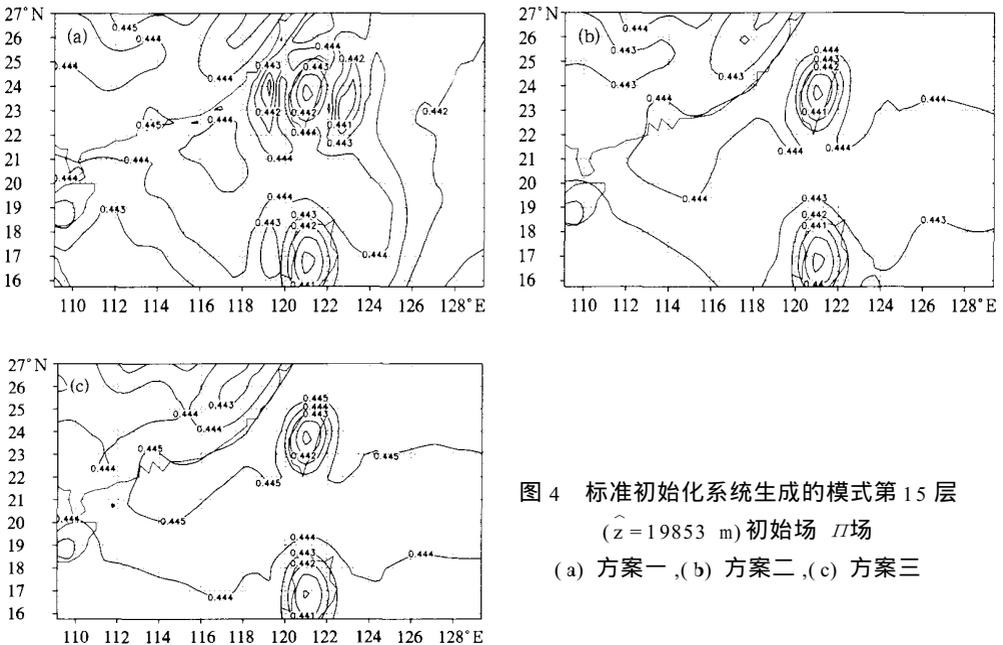


图 4 标准初始化系统生成的模式第 15 层 ($\hat{z} = 19853 \text{ m}$) 初始场 Π 场
(a) 方案一, (b) 方案二, (c) 方案三

本身的差别造成的。3种方案产生的不同结果可以解释为方案一、二的 Π 场是由 θ 通过静力平衡关系垂直积分得到, θ 本身的插值误差就会垂直累积到 Π 场上, 越到高层, Π 场的差别就会越大, 方案一采用的是最简单的线性垂直插值方案, 其误差也就最大, 于是到模式高层, 在地形梯度较大的地方, 就会有较大的误差积累, 从而造成虚假的扰动生成。

而对于模式的预报量 Π 场, 如图5、图6, 3种方案产生的初始场的差别更为明显, 方案

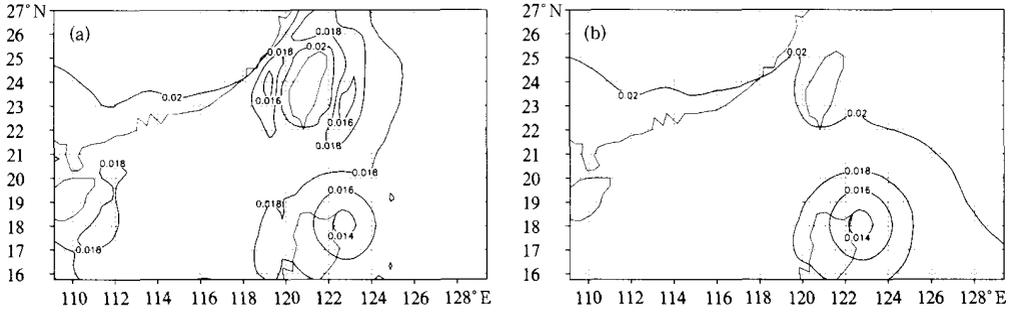


图5 标准初始化系统生成的模式第5层 ($\hat{z} = 5147 \text{ m}$) 初始场 Π 场
(a) 方案一, (b) 方案二, (c) 方案三

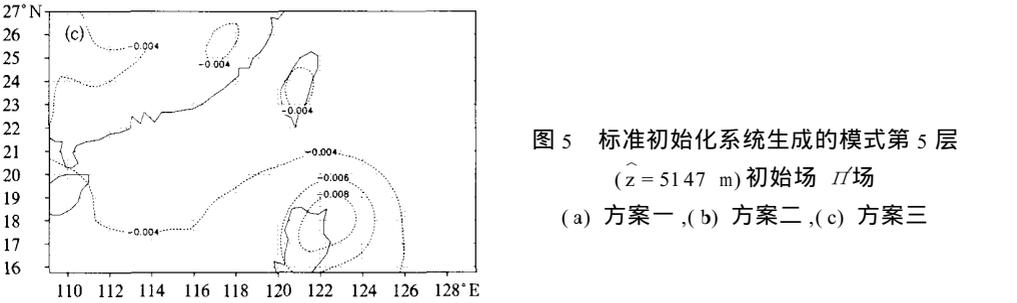


图6 标准初始化系统生成的模式第15层 ($\hat{z} = 19853 \text{ m}$) 初始场 Π 场
(a) 方案一, (b) 方案二, (c) 方案三

一的结果无论是在低层还是高层,在地形梯度较大的地方都有许多虚假的扰动,其效果明显不如方案二及方案三的结果;方案二与方案三产生的模式初始 Π 场间的差别也较 Π 场明显,但由于这两种方案采用的是不同的参考廓线,其值没有可比性。

为能更清楚地看到各种方案产生的模式预报量 Π 初始场,我们设计了一个较为理想的状况,即输入的背景场为水平均匀的温度场及高度场,其值为粗网格模式资料全场水平平均值,具体值对应表 1。

表 1 理想状况下的温度场与高度场

气压值/hPa	温度/K	高度场/gpm	气压值/hPa	温度/K	高度场/gpm
1000	285	64	200	219	11851
925	281	713	150	214	13674
850	278	1409	100	209	16183
700	270	2975	70	210	18364
600	263	4182	50	212	20447
500	255	5568	30	215	23633
400	244	7202	20	217	26216
300	230	9199	10	218	30620
250	224	10413			

图 7 给出了理想状况下 3 种方案产生的模式预报量 Π 初始场,可以更明显地看出,方案一产生的初始场有许多虚假的扰动,整个场比较混乱,难以反映背景场的形势,而方案二及方案三整场看起来要平滑得多,尤其方案三,其整场结构与地形非常相似,这与 Π 场特性是相吻合的。

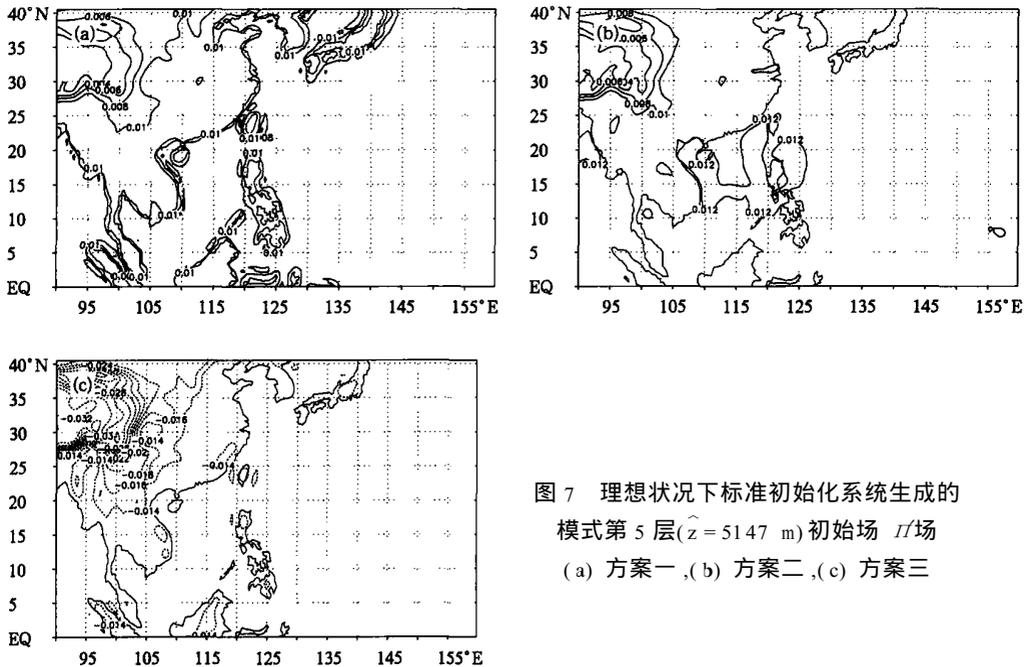


图 7 理想状况下标准初始化系统生成的模式第 5 层 ($z = 5147$ m) 初始场 Π 场
(a) 方案一, (b) 方案二, (c) 方案三

下面比较 3 种方案的结果与输入的等压面分析场之间的状况,这里采用的等压面分析场是国家气象中心的中期预报模式——T213 模式分析场。采用同样的后处理程序,我们将 3 种方案产生的初始场还原到本来的 T213 等压面上,与输入的背景场 T213 的分析场进行比较。从温度场的结果(图略)可以看出,3 种方案的结果都能较好地接近 T213 场,其中尤以方案二的结果与 T213 场最为接近,其误差不超过 0.5 K,方案一的误差主要来源于简单的垂直线性插值,而方案三则可能来自于通过静力平衡关系内插得到 θ 而造成的。图 8 为 500 hPa 的高度场,可以看出,方案一的结果与原来的背景场相距甚远,原来的系统已经完全看不见了,若把初始场还原到等压面上的值与 T213 分析场的差作为插值误差,则方案一 500 hPa 全场平均的误差绝对值为 74.22 gpm,这很容易让人怀疑结果的正确性,从而影响对模式预报结果的可靠性;而其余两种方案的结果与 T213 的分析场很相似,尤其是方案三的结果,几乎与原场一模一样,其最大误差为 0.8 gpm,从 500 hPa 全场平均的误差绝对值来看,方案二为 8.34 gpm,而方案三只有 0.13 gpm。根据方案设定,我们认为方案一的误差有垂直插值方法带来的误差,通过静力平衡关系垂直积分得到 Π 造成的误差积累两种误差来源,方案二的误差则主要来自于通过静力平衡关系垂直积分得到 Π 造成的误差积累。

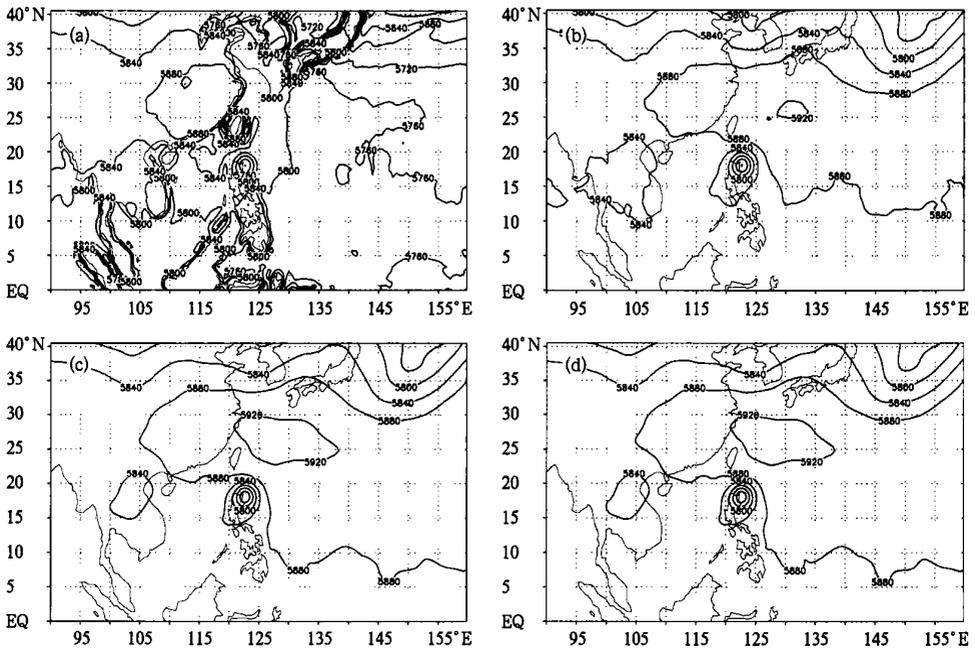


图 8 模式初始场还原到等压面 500 hPa 高度场(单位:gpm)
(a) 方案一, (b) 方案二, (c) 方案三, (d) T213 分析场

4 结 论

GRAPES 模式标准初始化程序在完成其主要功能的同时,通过灵活的程序设计,对

初始化系统的时间、区域、分辨率、垂直层次、水平插值方法、垂直插值方法等都能灵活选取,从而使得标准初始化系统可以很容易满足模式初值的各种需求,在模式框架调试、与物理过程及三维变分(3D_VAR)系统的连接试验中提供了条件,其方案也可以用于其他类似模式的初值生成中。通过3种模式初值生成方案的比较分析,我们得到以下结论:

(1) 变量场 u 、 v 、 T 、 θ 对插值方法的精度并不是很敏感,而高度场 H 以及 Π 场则对垂直插值方法的精度要求很高。

(2) 在3种模式变量产生方案中,方案一的效果最差,但它计算速度快,在地形梯度不大的地方可以选择使用;方案二与方案三的效果比较好,用户可根据自己的需求任意选择。

致 谢: GRAPES 模式标准初始化系统方案设计得到中国科学院大气物理研究所的张道明、陈嘉宾老师的指导,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Lorenz E N. Deterministic non-periodic flow. *J Atmos Sci*, 1963, **20**:130~141.
- 2 Lorenz E N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, 1965, **17**:321~333.
- 3 Lorenz E N. The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*, 1969, **21**:289~307.
- 4 Lorenz E N. Effects of Analysis and Model Errors on Routine Weather Forecasts. Proc ECMWF Seminar on Ten Years of Medium-Range Weather Forecasting, ECMWF 1989. 115~128.
- 5 Jimmy Dudhia, Dave Gill, Kevin Manning, et al. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide. <http://www.mmm.ucar.edu/mmm5/documents/tutorial-v3-notes.html>.
- 6 Xue Ming, Kelvin K Droegemeier, Vince Wong, et al. Advanced Regional Prediction System(ARPS) version 4.0 User's Guide. <ftp://ftp.caps.ou.edu/pub/ARPS/ARPSdocs/ARPS4DOC.PDF>.
- 7 User's Guide for Weather Research and Forecast(WRF) Modeling System Version 2. http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide/contents.html.
- 8 李庆扬,关治,白峰杉编著.数值计算原理.北京:清华大学出版社,2000.

SCHEMES AND APPLICATIONS OF GRAPES MODEL STANDARD INITIALIZATION

Huang Liping Wu Xiangjun Jin Zhiyan

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

The designed schemes and programmed structures of the GRAPES model standard initialization (SI) system are introduced, with analysis of the initial fields from three schemes. Results indicate that fields of horizontal winds, temperatures and potential temperatures are not very sensitive to the precision of the interpolation scheme selected in sharp contrast to the geopotential field and Exner function for pressure that are sensitive to the accuracy of a vertical interpolation. For generating model variables Scheme I is poorer compared to the others except its fast computational speed, but applicable to the model domain with smaller terrain gradient; either Schemes II or III can be chosen for use according to requirements. The SI system has its own primary functions, apart from which requirement-specific option of the system provided regions, resolutions, number of vertical layers, and horizontal/vertical interpolation techniques given by the flexible designed programs can be made to satisfying the requirements of initial values, thereby facilitating the model development, research and experiment.

Key words: Cubic spline Interpolation scheme Initial fields