

T63 中期数值天气预报谱模式

皇甫雪官

(国家气象中心, 北京 100081)

提 要

简要地介绍了国家气象中心中期数值天气预报模式。并且, 给出了业务 7 天预报初步结果, 其有效预报达 5—6 天。

关键词: T63 谱模式 计算方法 物理过程 预报检验

引 言

中期数值天气预报业务系统是在超级计算机上进行高效率、高质量的全球实时观测资料采集、处理和分析, 运用高分辨率和物理过程比较完善的全球数值天气预报模式滚动地制作逐日(日前制作 7 天)天气预报, 并迅速地将分析预报产品分发到全国各应用部门的实时业务系统。

预报模式是中期数值天气预报业务系统的重要组成部分。目前该模式是从欧洲中期天气预报中心引进的八十年代中后期的业务预报谱模式 T106L19 版本的基础上, 把它改造成为适应我国情况的 T63L16。

1 T63 中期数值天气预报谱模式

1.1 模式方程组

作较长时间的中期数值天气预报, 采用球面地形坐标是合适的。为了使垂直坐标一般化, 采用了 η -坐标系, 令该坐标必须是气压 P 的单调函数, 并同时依赖于地面气压 P_s , 满足

$$\eta(0, P_s) = 0$$

$$\eta(P_s, P_s) = 1$$

在此坐标系中, 动力学方程组可写成:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} - (f + \zeta)V + \eta \frac{\partial U}{\partial \eta} + \frac{R_d T_v}{a} \frac{\partial}{\partial \lambda} \ln p \\ + \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \lambda} (\Phi + E) = P_v + K_v \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} - (f + \zeta)U + \eta \frac{\partial V}{\partial \eta} \\ + \frac{R_d T_v}{a} (1 - \mu^2) \frac{\partial}{\partial \mu} \ln p + \frac{1 - \mu^2}{a} \\ \cdot \frac{\partial}{\partial \mu} (\Phi + E) = P_v + K_v \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{U}{a(1 - \mu^2)} \frac{\partial T}{\partial \lambda} + \frac{V \partial T}{a \partial \mu} + \eta \frac{\partial T}{\partial \eta} \\ - \frac{\kappa T_v \omega}{(1 + (\delta - 1)q)p} = P_T + K_T \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{U}{a(1 - \mu^2)} \frac{\partial q}{\partial \lambda} \\ + \frac{V \partial q}{a \partial \mu} + \eta \frac{\partial q}{\partial \eta} = P_q + K_q \quad (4) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial p}{\partial \lambda} \right) + \nabla \cdot (\vec{V}_h \frac{\partial p}{\partial \eta}) \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\eta \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \eta} = - \frac{R_d T_v}{p} \frac{\partial p}{\partial \eta} \quad (6)$$

$$\omega = - \int_0^\eta \nabla \cdot (\vec{V}_h \frac{\partial p}{\partial \eta}) d\eta + \vec{V}_h \cdot \nabla P \quad (7)$$

1.2 数值计算方法

在水平方向上, 采用谱方法进行计算, 首先将模式变量作球谐函数有限级数展开

$$X(\lambda, \mu, \eta, t) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=m}^{N(m)} X_n^m(\eta, t) P_n^m(\mu) e^{im\lambda} \quad (8)$$

其中 $P_n^m(\mu)$ 是连带勒让德多项式, 而 X_n^m 为

$$X_n^m(\eta, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 \int_0^{2\pi} X(\lambda, \mu, \eta, t) P_n^m(\mu) e^{-im\lambda} d\lambda d\mu \quad (9)$$

利用球谐函数的性质, 可把动力方程组写成以变量谱系数为未知数的常微分方程组。

在作球谐谱展开时, 采用三角形波数截断方式, 则 $N(m) = M$, 式(8)至(9)的双重积分中的内积分部分采用 FFT 技术, 外重积分部分采用精确的高斯积分公式。非线性项如 F_U, F_V, F_T, F_q, F_P 在高斯格点上计算。高斯网格在全球面上的大小是: 纬向有 $3M+1$ 个等格距点, 经向有 $\frac{1}{2}(3M+1)$ 个不等格距点。在 T63L16 模式中, 取 $M=63$, 则网格距约为 1.875 经纬度。在垂直方向上采用差分方法。将模式大气分为不等距 16 层。

在倾向方程中的垂直积分化成求和格式, 在连续方程中求 $\eta \frac{\partial p}{\partial \eta}$ 的方法, 在垂直平流项中的差分方案, 静力方程的有限差格式, 气压梯度力项的计算公式以及热力方程中的能量转换项的计算方法, 均协调一致, 使之角动量守恒, 确保计算稳定。

模式对散度、温度和地面气压方程采用半隐式时间积分方案, 并引进了时间滤波以防止计算波的虚假增长; 另外, 还对涡度与水汽方程中的纬向平流项采用了半隐式方法, 以增加它们计算的稳定性。对于 T63L16 模式, 半隐式时间积分步长为 22.5 分钟。

模式的水平扩散采用四阶线性的隐式计算方法, 在山顶与陡山坡附近, 为避免虚假的增温, 对温度扩散采用一种修正的扩散方案, 同时在平流层引入增强性扩散和在对流层中

对最大风速超过临界值的某些层次进行强风阻尼。

最后, 在模式计算中引进了并行计算技术。在银河-2 巨型机四个 CPU 及其宏任务软件库支持下, 谱模式 T63L16 已实现了大粒度的子程序的并行计算, 倍速因子为 3.5, 作 7 天全球预报需墙钟时间为 1.05 小时。

1.3 物理过程

模式方程中的 P_U, P_V, P_T, P_q 项表示物理过程, 也就是辐射、水汽凝结和蒸发、热量、动量和水汽湍流输送, 以及地面行星边界层的作用等。这些物理过程的空间和时间尺度很小, 故在模式中以参数化的方式出现, 这里仅作简要描述。

在设计辐射方案时, 比较详细地考虑了云与辐射之间的相互作用, 它允许在模式任何层次上存在部分云盖, 而且考虑了多层云对辐射的散射作用。方案中考虑了 CO_2 、臭氧、气溶胶和地表征状的作用。

垂直方向上的涡度通量(热量、动量、水汽的湍流通量)是通过扩散过程来操作的。与大气稳定度有关的地面通量和扩散系数是根据莫宁-奥布霍夫相似理论来决定。还考虑了植被对地面的蒸发作用和与雪盖有关的感热通量的作用。

从两个方面考虑地形作用: 一是地形作为模式的下边界, 采用包络地形作为地形的几何表示; 一是地形的重力波曳力作用, 当稳定的层状气流与不平的地形发生作用时, 激发出重力波, 它的向上传输和破碎, 把动量与热量消耗在大气中, 这就是所谓的“地形重力波拖曳力作用”。

在考虑湿度过程时, 将层状云降水和对流云降水分开。前者用一般的饱和凝结法, 当模式预报的比湿过饱和时, 发生凝结, 凝结出

来的水分作为降水,并从原水汽中扣除,同时凝结潜热释放,加热大气。还考虑降水在下降过程中的蒸发。对于积云降水考虑了深积云对流和浅对流作用。深积云对流采用了熟知的郭晓岚(1974)方案,其产生的降水是由于环境大气不稳定和大尺度水汽的辐合引起的。

最后,在地表过程中,采用了一个三层扩散方程的有限差分近似,并在最低层加进了气候值。另外,还包括了对雪盖的预报。

T63 谱模式对 T42 谱模式而言,无论在模式分辨率和物理过程方面,是我国中期数值天气预报业务系统的一个重要发展,两者的主要特点如表 1 所示。

表 1 中期预报系统 T63 和 T42 的比较

		T42	T63
		全球 约 300km	全球 约 200km
分析	范围		
	水平分辨率		
	分析层次	12 层:1000, 850, 700, 500, 400, 300, 200, 150, 100, 70, 50hPa	15 层:1000, 850, 700, 500, 400, 300, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10hPa
	所用观测资料	探空、测风、地面/船舶、飞机、卫星测风、测厚、浮漂站、高空人造站	同左
同化	客观分析方法	最优多元插值	同左
	初估场	6 小时预报	同左
初值化	每日次数	四次全球资料同化	同左
	方案	非线性绝热 正规模初值化	非线性非绝热正规模初值化,排除了日潮和半日潮的影响,克服了绝热方案减弱热带散度的缺点。
预报模式	预报天数	5 天	7 天
	模式方程	初始方程组	同左
	范围	全球	同左
	水平分辨率	三角形截波 42 相当于 格距 2.8125 经纬度	三角形截波 63 相当于 格距 1.875 经纬度
	垂直坐标与 分层层数	σ 坐标, 9 层, 等分	σ -P 混合坐标 16 层, 非等分低层密, 层数多
	计算方法	空间的水平方向采用谱方法,垂直方向采用差分法,时间积分方案采用半隐式方法,时间步长 30 分钟	空间的水平方向采用谱方法,垂直方向采用差分法,时间积分方案采用半隐式方法,平流项中平均运动的平流项采用隐式方法计算,时间步长 22.5 分钟
	程序结构	串行计算	可进行多任务并行计算
	地形作用	谱展开地形	包络地形的谱展开 地形激发重力波曳力作用
	降水方案	大尺度降水采用过饱和凝结法,次网格尺度降水采用 Kuo 对流参数化(1974)方法。	大尺度降水采用过饱和凝结法,次网格尺度降水采用 Kuo 对流参数化(1974)方法,还考虑浅对流参数化降水
	水平扩散	动量、热量水汽的水平扩散采用四阶线性隐式扩散方案,扩散系数随波长、变量而变。	同左

续表 1

		T42	T63
预报模式	垂直扩散	动量、热量、水汽的垂直湍流交换,其扩散系数仅取决于混合长和风的切变。	动量、热量、水汽的垂直湍流交换在地表层采用莫宁-奥布霍夫相似理论,在表面层以上采用混合长理论,并且考虑与大气的稳定度有关。
	地面过程	陆面、雪面和海冰上的地面温度采用地表能量平衡方程计算,在洋面上使用气候平均温度。	陆面温度采用热传导方程进行预报,考虑到感热、潜热、辐射、土壤深层温湿等影响,洋面温度用气候值。
	辐射方案	70年代的GFDL辐射方案,考虑了云、CO ₂ 、O ₃ 对辐射的吸收,气体的散射及地面的反射作用。	80年代中期的ECMWF辐射方案考虑到瑞利散射,云和气溶胶的散射和吸收,地表的吸收和反射。云考虑到云类、云高和云量变化;气溶胶随高度变化,且依城市、海洋、沙漠、平流层而变化;O ₃ 随高度、经纬度季节变化。
水平方向插值		谱方法	谱方法
后处理	垂直插值	内插:对数线性插值 外插:高度利用静力方程外推,温度采用三维外推,风采用线性外推。	内插:张力样条插值 外插:模式层以上的风、位势进行线性外推,向下外推采用理论公式计算位势和温度。
	其它		用边界层理论计算2米处的温度、湿度和10米处的风

2 业务系统的预报效果检验

表2列出了在CRAY巨型机上T63中期数值天气预报业务系统与CYBER大型机上T42系统在1994年第4季度北半球

500hPa高度场统计检验的季平均结果。其中RMSE为平均均方根误差,A.COR为距平相关系数,T.COR为倾向相关系数。

表2 T63与T42预报检验比较

预报天数		1	2	3	4	5	6	7
RMSE	T42	25.7	41.4	56.8	71.7	84.6		
	T63	13.7	32.4	46.8	59.5	71.2	82.6	92.2
A.COR	T42	0.924	0.839	0.755	0.683	0.511		
	T63	0.970	0.918	0.837	0.754	0.657	0.552	0.438
T.COR	T42	0.850	0.844	0.803	0.734	0.669		
	T63	0.921	0.905	0.856	0.813	0.775	0.718	0.632

可见T63系统的中期预报一致地比T42系统好,T63系统的有用预报天数达

5—6天,比T42系统延长一天或稍多。

参考文献(略)

The Medium Range Numerical Weather Prediction Spectral Model T63

Huangfu Xueguan

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

The medium-range weather prediction spectral model T63 used at National Meteorological Center is described briefly. The primary 7 days operational forecast results are given, and they show that the useful forecast can reach 5—6 days.

Key Words: spectral model T63 physical process computational method