

王亚华,杨晓帆,曾勇虎,等. GRAPES 全球模式背景误差协方差水平结构特征分析[J]. 干旱气象,2017,35(1):57-63, [WANG Yahua, YANG Xiaofan, ZENG Yonghu, et al. Horizontal Structural Characteristics Analysis of Global GRAPES Model Background Error Covariance[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(1):57-63], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-01-0057

GRAPES 全球模式背景误差协方差 水平结构特征分析

王亚华,杨晓帆,曾勇虎,汪连栋

(电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室,河南 洛阳 471000)

摘要:基于 1 个月的 GRAPES 全球模式模拟资料,采用 NMC 方法统计了 GRAPES 全球模式的背景误差协方差,从背景误差的谱曲线和水平相关特征尺度 2 方面对背景误差协方差的水平结构进行分析,并与欧洲中心的计算结果进行比较。结果表明:2 种模式的谱曲线变化趋势较为一致,背景误差的动能谱和位势高度功率谱均在 1—7 的波数范围逐渐增大,在 7—14 的波数范围取得最大值,之后随着波数的增大,谱值逐渐减小;在波数 > 20 的范围内,总动能谱随波数的衰减主要由旋转动能谱随波数的减小造成。采用谱方法和格点方法进行水平相关特征尺度的计算,结果表明二者计算得到的背景误差的水平相关特征尺度随高度的升高而增大,随波数的增大而减小,但谱方法的计算结果大于格点方法。

关键词:GRAPES 全球模式;背景误差功率谱;水平相关特征尺度

文章编号:1006-7639(2017)-01-0057-07 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-01-0057

中图分类号:P456.7

文献标识码:A

引言

资料同化的目的是为模式提供更加准确的初始场,特别是卫星等高分辨率资料的同化分析对模式预报效果有显著提高^[1-2],而同化过程的好坏与背景误差协方差矩阵的准确性密切相关。背景误差协方差矩阵实质上是预报误差的概率密度分布函数^[3-4],控制信息从观测位置向四周传播的方式,决定模式变量之间在动力上是否协调一致,是资料同化过程中的重要参数。在三维变分分析中,分析增量的空间结构和多变量关系取决于背景误差协方差的结构。由于大气的真实状态是未知的,理论上不可能得到准确的背景误差协方差,而且其矩阵规模庞大,存储计算代价大。在实际的同化系统中通常采用变量变换的方法将模式变量转化为不相关的控制变量,并假设这些控制变量在水平空间中的自相关具有同质性与各向同性,在此基础上将单变量的背景误差协方差矩阵分解为误差标准差、水平相关和垂直相关 3 部分^[5]。其中,误差标准差一般是统

计得出,垂直相关由经验公式或统计结果给出,水平相关对观测信息对四周的影响程度及范围起决定性作用,而水平相关的计算方法也较多,如信息向量法、NMC(National Meteorological Center)方法等等。背景误差协方差的水平结构是否合理,直接关系到同化过程能否给出合理的分析场,进而影响到预报结果的准确性。水平相关的准确性对同化结果至关重要,水平相关的分析可以从背景误差功率谱和水平相关特征尺度 2 方面展开。

Rabier 等^[6]利用欧洲中期天气预报中心全球中期模式 T106L31 的 24 h 与 48 h 在同一时刻的预报偏差来表示背景误差的增长,采用 NMC 方法^[7]对背景误差湍流功率谱进行分析,结果表明在能谱—波数双对数图中,500 hPa 高度,质量场(即位势高度)功率谱从 1—5 波逐步增大,到 6—10 波达到最大值,然后逐步降低,在 20—60 波呈现出大约 -3.2 的斜率,在 60—90 波呈现 -4.5 的斜率,而且在不同的高度斜率呈现出不同特点,不同变量也呈现出

收稿日期:2016-07-13;改回日期:2016-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目“复杂风场下多颗粒混合空间的太赫兹波传播特性研究”(61601472)资助

作者简介:王亚华(1990-),女,河北清河人,助理工程师,主要从事资料同化研究. E-mail:wyhqxy@163.com

不同特征。背景误差湍流功率谱特点也可以从观测空间计算获得,在基于更新矢量(Innovation Vector)方法的许多研究工作^[8-11]中都揭示出质量场在20—60波之间的斜率值在-3左右。龚建东^[12]将其他文献中的质量场的背景误差湍流功率谱计算结果与真实大气湍流功率谱进行对比,分析了不同尺度波动背景误差的大小;同时指出,水平相关特征尺度与背景误差湍流功率谱斜率,特别是次天气尺度(20—60波)到中尺度(>60波)的背景误差湍流功率谱斜率密切相关。

王金成等^[13]采用NMC方法估计了GRAPES(Global and Regional Assimilation and Prediction System)全球模式的背景误差方差、水平相关特征尺度和垂直相关结构,结果显示GRAPES水平相关特征尺度随纬度和高度有显著不同,流函数、势函数和非平衡位势高度的背景误差水平相关特征尺度总体上随高度增大,赤道地区水平相关特征尺度大,中高纬度小;由于分辨率较低,GRAPES的水平相关特征尺度相比欧洲中心的计算结果将近大1倍。

王金成等^[13]对GRAPES全球模式背景误差协方差的水平结构分析只局限在水平相关特征尺度的计算分析,并未提及背景误差的水平功率谱。龚建东^[12]明确指出背景误差功率谱与水平相关特征尺度之间存在相关关系,但其仅仅采用其他文献中的其它模式结果分析背景误差湍流功率谱的斜率特征,指出其对水平相关特征尺度计算的影响,并未对GRAPES全球模式的模式动能谱和背景误差湍流功率谱进行具体计算。王亚华等^[14-15]计算分析了GRAPES全球模式的模式动能谱的垂直分布及旋转辐散分量的相对大小,通过与实际大气动能谱的对比分析评估了模式的整体预报效果,结果表明模式能够较为准确地再现大气的大尺度波动,对中小尺度波动的描述误差较大。GRAPES全球模式对中小尺度波动描述不准确,那么模式的背景误差湍流功率谱是否与观测及其他文献结果一致?水平相关特征尺度的计算是否受影响?此类工作目前尚未开展。

本文拟采用NMC方法对模式预报结果统计背景误差协方差,分析背景误差协方差的水平结构特征,主要包括背景误差湍流功率谱和水平相关特征尺度,检验模式背景误差协方差水平结构的合理性和适用性,分析其对模式预报效果的影响,为后续模式的改进提供参考。由于谱曲线的月变化和季节变化较小,因此可以采用1个月的资料进行计算分析。同时需要指出,由于GRAPES全球模式的分辨率较

低,其在较大尺度范围较为准确,在中小尺度误差较大,本文的分析主要针对较大尺度分量,特别是波数<100的尺度范围。

1 数据说明

GRAPES模式是我国自主研发的新一代同化预报系统,包括有限区域中尺度预报(GRAPES-MESO)和全球中期天气预报(GRAPES-GFS)2套系统^[16-18]。这2套系统是一体化发展的统一模式(Unified Model),具有通用的模式动力框架、资料同化框架以及统一的基础软件架构。全球三维变分同化系统中为了简化背景误差协方差的计算,通过预调节的方式,即经过水平变换、垂直变换和物理变换,实现模式变量与控制变量的转换,同化过程是在控制变量的基础上进行,而模式预报资料中含有位势高度、温度等模式变量,因此在统计背景误差协方差时需要进行变量转换,将模式变量转化为控制变量。

采用GRAPES全球中期数值预报系统2013年5月1—31日12:00(世界时,下同)的24h和48h预报结果统计背景误差,共计30个预报差值样本。背景误差计算所用模式预报资料的水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,垂直方向共29层,预报资料中包含位势高度、温度、风场和比湿等模式变量,而GRAPES变分同化系统的分辨率为 $0.5625^\circ \times 0.5625^\circ$,所用变量为流函数(psi)、势函数(chi)、非平衡位势高度(phiu)和比湿(q)4个控制变量。因此,首先需要得到的预报差值样本由 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率的网格数据插值为 $0.5625^\circ \times 0.5625^\circ$ 分辨率的网格数据,同时进行变量转换^[5],由模式变量换算为控制变量,得到控制变量的背景误差统计值;然后采用谱方法计算控制变量的背景误差的功率谱、动能谱和水平相关特征尺度。

2 计算方法

2.1 谱计算

通过谱展开的方法,可以将气象场变量分解为不同尺度分量叠加,谱系数的平方大小体现了该尺度分量的相对大小,不同波数对应不同尺度,谱系数的平方随波数的变化称为功率谱。将动能进行谱展开得到的功率谱一般称为动能谱。动能谱可以表示为旋转分量与辐散分量之和^[14-15],这里将动能谱的旋转分量称为旋转动能谱(Rotational Kinetic Energy Spectrum,简称RKE,单位: $m^2 \cdot s^{-2}$),将动能谱的辐散分量称为辐散动能谱(Divergent Kinetic Energy

Spectrum, 简称 DKE, 单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$), 将二者之和称为总动能谱 (Total Kinetic Energy Spectrum, 简称 TKE, 单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)。

假设变量的背景误差为 x , 针对变量的背景误差 (24 h 和 48 h 预报值之差) 进行去平均处理, 即将变量减去其在球面上的平均值, 然后球谐函数展开^[6]:

$$x = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n x_n^m Y_n^m \quad (1)$$

其中, Y_n^m 为球谐函数, x_n^m 表示谱系数, m 为纬向波数, n 为总波数, 也表示球谐函数的阶, N 为总的截断波数, 其中 $0.5625^\circ \times 0.5625^\circ$ 分辨率下的最大有效截断波数为 213。

给定总波数 n 的功率谱为:

$$D_{n(x)} = \sum_{m=-n}^n \langle x_n^m x_n^{m*} \rangle = (2n+1)b_n \quad (2)$$

其中, x_n^{m*} 为谱系数 x_n^m 的共轭, $\langle \rangle$ 表示数学期望, b_n 表示与纬向波数 m 无关的模式方差。

已知涡度 $\zeta = \nabla^2(\text{psi})$, 散度 $\chi = \nabla^2(\text{chi})$, 则总动能谱、旋转动能谱及辐散动能谱分别为^[19]:

$$\begin{cases} D_{n(\text{TKE})} = \frac{a^2}{4n(n+1)} \sum_{m=-n}^n (|\zeta_n^m|^2 + |\delta_n^m|^2) \\ D_{n(\text{RKE})} = \frac{a^2}{4n(n+1)} \sum_{m=-n}^n |\zeta_n^m|^2 \\ D_{n(\text{DKE})} = \frac{a^2}{4n(n+1)} \sum_{m=-n}^n |\delta_n^m|^2 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $D_{n(\text{TKE})}$ 为总动能谱, $D_{n(\text{RKE})}$ 为旋转动能谱, $D_{n(\text{DKE})}$ 为辐散动能谱, a 为地球半径, $a = 6371 \text{ km}$ 。

标准化后的功率谱为:

$$\begin{cases} h_{n(x)} = \frac{D_{n(x)}}{\sigma_{(x)}^2} \\ \sigma_{(x)}^2 = \sum_{n=0}^N D_{n(x)} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 水平相关特征尺度计算

水平相关特征尺度控制观测信息能够影响到的范围, 是同化过程中的重要参数。依据 Daley^[20] 提出的方法, 背景误差协方差的水平相关特征尺度可以由变量的谱系数计算得到:

$$L^2 = 2a^2 \frac{\sum_n D_n}{\sum_n D_n n(n+1)} \quad (5)$$

式中, L 表示水平相关特征尺度, 单位: km。

王金成等^[13] 采用 Wu 等^[21] 提出的方法进行水平相关特征尺度的计算, 该方法无需进行谱转换, 假设变量误差水平协方差满足各向同性、同质及高斯

相关, 水平相关特征尺度可以通过变量方差与其拉普拉斯算子作用后的变量方差的比值得到:

$$L = \left[\frac{8V_\psi}{V_\zeta} \right]^{1/4} \quad (6)$$

其中, V_ψ 表示流函数的方差, V_ζ 表示涡度的方差。该方法无需进行谱变换, 利用格点数据可以计算得到, 即空间中每个格点都对应有自己的特征尺度, 将水平相关特征尺度在水平空间求平均, 即可得到水平相关特征尺度随高度的变化曲线。由于该方法利用网格点数据计算得到, 故也将该方法简称为格点方法。

3 结果分析

3.1 谱分析

图 1 分别为背景误差的旋转动能谱、辐散动能谱、总动能谱和位势高度功率谱在不同高度的谱曲线。可以看出, 旋转动能谱、辐散动能谱、总动能谱和位势高度功率谱的谱值在 4 个高度层的变化趋势一致: 在 1—7 的波数范围随波数的增加而增大, 在 7—14 的波数范围取得最大值 (表 1), 当波数 > 14, 谱值随着波数的增加而减小。同时, 在波数 < 10 的范围内, 100 hPa 高度上的谱值明显大于其它几个高度层, 而在波数 > 100 的范围内, 100 hPa 的功率谱基本上小于等于其它几个层次, 说明平流层中较大尺度波动占优, 而对流层则是以较小尺度波动占优。比较图 1c 和图 1d 可知, 在 1—10 的波数范围内, 总动能谱值要比位势高度功率谱值小; 在 > 10 的波数范围内, 总动能谱曲线随波数的增大缓慢减小, 位势高度功率谱曲线随波数的增大近似线性递减, 总动能谱的谱值逐渐大于位势高度功率谱的谱值。由此可以看出, 对于较大尺度的波动中质量场所占比重较大, 而较小尺度的波动则是动量场所占比重较大。

表 1 旋转动能谱、辐散动能谱、总动能谱和位势高度功率谱曲线在不同高度层取得最大值的位置波数

Tab. 1 The wavenumber where rotational kinetic energy spectrum, divergent kinetic energy spectrum, total kinetic energy spectrum and geopotential height power spectrum get maximum at different levels

高度层/hPa	RKE	DKE	TKE	H
850	14	13	11	8
500	14	11	14	10
200	11	12	11	9
100	9	8	8	7

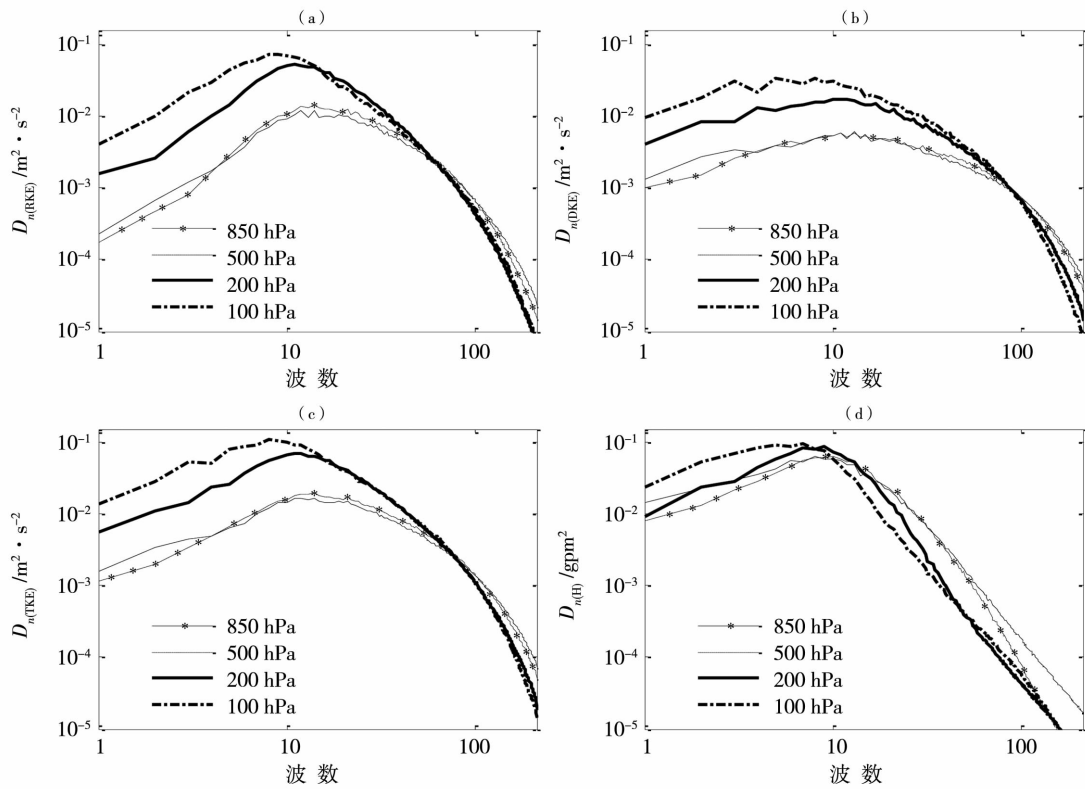


图1 NMC方法统计得到的850、500、200和100 hPa高度层上背景误差的旋转动能谱(a)、辐散动能谱(b)、总动能谱(c)和位势高度功率谱(d)的谱曲线

Fig. 1 The rotational kinetic energy spectrum (a), divergent kinetic energy spectrum (b), total kinetic energy spectrum (c), and geopotential height power spectrum (d) of background error obtained by using NMC method on 850 hPa, 500 hPa, 200 hPa and 100 hPa

4—20 波数范围的波动称为天气尺度波,波数 >60 的波称为中尺度波,介于天气尺度和中尺度之间的波动称为次天气尺度波(波数 20—60)。表 2 列出 850、500、200 和 100 hPa 高度层的动能谱曲线在波数 20—60 和 60—100 之间的拟合斜率值,可以看出,在 20—60 波数范围内,背景误差的旋转动能谱的拟合斜率值平均为 -1.8,在 60—100 波数范围的斜率平均为 -2.9;辐散动能谱的斜率平均值分别为 -1.2 和 -2.2,总动能谱的斜率平均值分别为 -1.5 和 -2.4,位势高度功率谱的斜率平均值分别为 -3.2 和 -3.4。背景误差的辐散动能谱的斜率绝对值要明显小于旋转动能谱,说明辐散动能谱随波数的增大衰减缓慢,旋转动能谱随波数的增大衰减迅速,故总动能谱随波数的衰减以旋转动能谱的衰减为主。Rabier 等^[6]利用 ECMWF T106L31 全球模式资料 24 h、48 h 同一时刻的预报偏差来表示背景误差协方差,采用 NMC 方法也对旋转动能谱、辐散动能谱、位势高度的背景误差功率谱进行分析,这 3 个量在 20—60 和 60—100 波数范围内 850、500、200 和 100 hPa 高度层的斜率平均值分别为: -1.8 和

-4.2, -0.9 和 -3.0, -3.1 和 -4.2。将 GRAPES 模式结果与 ECMWF 模式结果进行对比发现,在波数 20—60 的次天气尺度范围二者的斜率值比较接近,但在波数 60—100 的中尺度范围,GRAPES 的斜率绝对值要明显小于 ECMWF 的斜率绝对值,这可能由模式分辨率的差异造成,GRAPES 模式能够描述 1—213 波数范围内的所有波动,而 ECMWF 只能描述 1—106 之间的波动,GRAPES 背景误差资料能够描述更多的中尺度波动,分辨率更高,因而对中尺度波动的描述能力要高于 ECMWF。Lönnerberg^[10]、Xu^[11]等基于更新矢量(Innovation Vector)方法从观测空间计算得到位势高度背景误差功率谱,指出其在 20—60 波数范围的斜率值在 -3 左右,与本文结果基本一致。

3.2 水平相关特征尺度

图 2 给出流函数、势函数、非平衡位势高度和比湿的水平相关特征尺度随波数和高度变化的等值线分布。可以看出:在 1—50 的波数范围内,流函数和势函数的水平相关特征尺度随高度变化不明显,主要随波数的增大而减小;波数 >50 的范围内,300 hPa

表 2 旋转动能谱、辐散动能谱、总动能谱和位势高度功率谱曲线在 20—60 和 60—100 波数范围内的拟合斜率值

Tab. 2 The fitting slopes of rotational kinetic energy spectrum, divergent kinetic energy spectrum, total kinetic energy spectrum and geopotential height power spectrum curves at different wavenumber range

谱	高度层/hPa	20—60 波数	60—100 波数
RKE	850	-1.363 1	-2.368 6
	500	-1.402 8	-2.648 6
	200	-2.319 3	-3.377 1
	100	-2.160 9	-3.179 6
DKE	850	-0.972 0	-1.544 9
	500	-0.805 2	-1.796 1
	200	-1.476 4	-2.472 4
	100	-1.629 3	-2.852 1
TKE	850	-1.181 9	-1.896 2
	500	-1.121 5	-2.131 2
	200	-1.858 3	-2.742 8
	100	-1.859 1	-2.968 1
H	850	-2.885 5	-3.206 2
	500	-3.191 5	-4.313 2
	200	-3.927 6	-3.113 9
	100	-2.992 9	-2.914 2

以上的高度层,流函数和势函数的水平相关特征尺度随波数变化不明显,主要随高度升高尺度增大。非平衡位势高度的水平相关特征尺度随波数和高度都有明显变化:随波数的增大而减小、随高度的升高而增大。比湿的水平相关特征尺度随高度变化不大,主要随波数增大而减小,而且波数越大水平相关特征尺度的递减幅度越小。

图 3 显示采用格点方法(实线)和谱方法(虚线)计算得到的流函数(图 3a)、势函数(图 3b)、非平衡位势高度(图 3c)和比湿(图 3d)4 个控制变量的水平相关特征尺度随高度的变化。其中,用谱方法计算的 4 个控制变量的水平相关特征尺度的大小关系是:势函数 > 流函数 > 非平衡位势高度 > 比湿。流函数的水平相关特征尺度在 1 000—300 hPa 之间随高度变化不大;在 300—70 hPa 之间随高度升高而增大,且在 70 hPa 附近达到极大值;势函数的水平相关特征尺度在 1 000—300 hPa 之间波动变化,在 800 和 400 hPa 附近分别存在 2 个峰值,400—50 hPa 之间随着高度的升高而增大,且在 50 hPa 附近达到极大值;非平衡位势高度的水平相关特征尺度随高度的升高而增大,且 100—50 hPa 之间增加明显;比湿的水平相关特征尺度随高度升高呈波动变化趋势,且在 120 hPa 附近出现极大值。

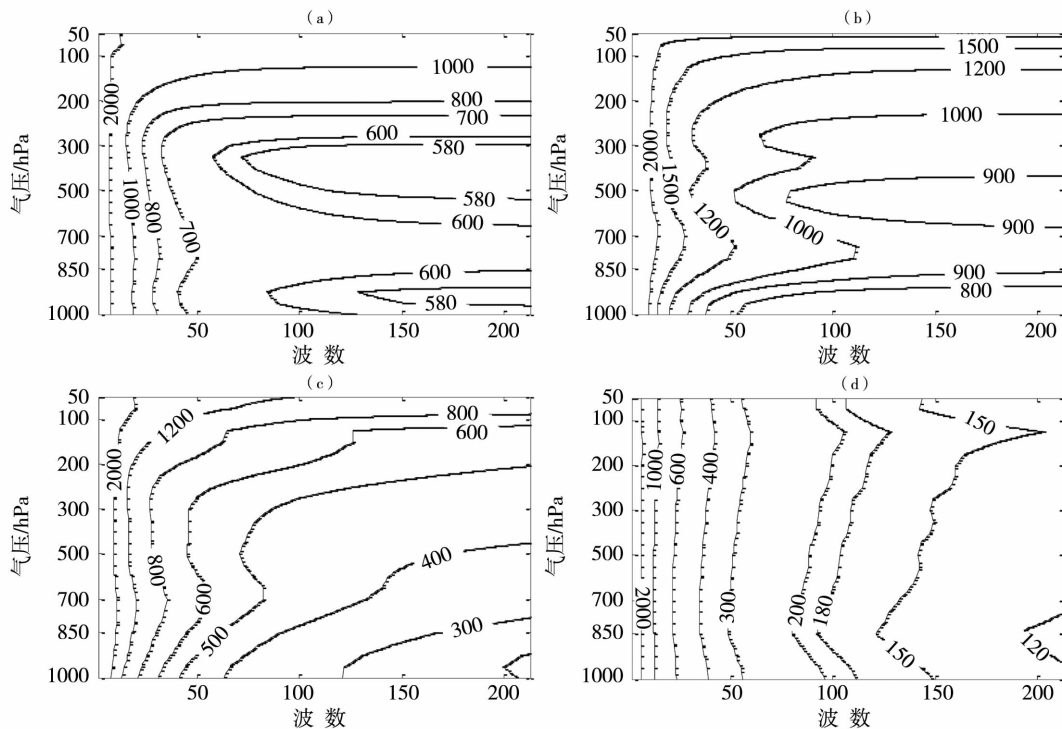


图 2 流函数(a)、势函数(b)、非平衡位势高度(c)和比湿(d)的水平相关特征尺度(单位:km)随波数和高度的等值线分布

Fig. 2 Horizontal correlation characteristic scales (Unit:km) as a function of wavenumber and height for stream function (a), potential function (b), unbalanced geopotential height (c) and specific humidity (d)

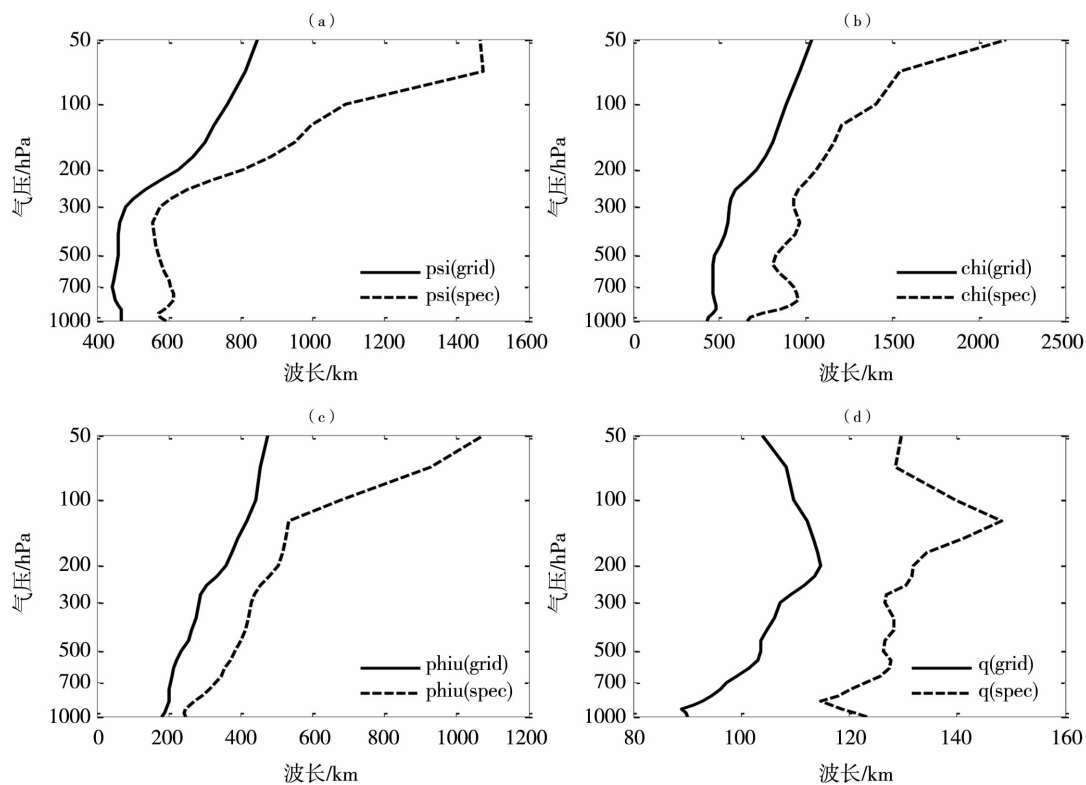


图3 格点方法(实线)和谱方法(虚线)计算得到的流函数(a)、势函数(b)、非平衡位势高度(c)和比湿(d)的水平相关特征尺度随高度的变化

Fig. 3 Horizontal correlation characteristic scales obtained by grid method (solid line) and spectral method (dotted line) as a function of height for stream function (a), potential function (b), unbalanced geopotential height (c) and specific humidity (d)

综上所述,2种方法得到的控制变量的水平相关特征尺度随高度的变化趋势基本一致,1 000—150 hPa 的高度范围内,整体随高度的增加水平相关特征尺度减小;谱方法计算得到的流函数、势函数、非平衡位势高度的水平相关特征尺度明显大于格点方法的计算结果,而且在 50 hPa 以下的高度层,随着高度升高,二者的差值变大;比湿的水平相关特征尺度也是谱方法的计算结果大于格点方法,但二者的差值随高度几乎不变。

4 结论

(1) 辐散动能谱、旋转动能谱、总动能谱和位势高度功率谱,都是在 1—7 的波数范围逐渐增大,在 7—14 的波数范围取得最大值,之后随着波数增大,谱值逐渐减小。

(2) 在波数 >20 的范围内,旋转动能谱、辐散动能谱和总动能谱都随着波数的增大而减小,但由于辐散动能谱随波数的衰减缓慢而旋转动能谱随波数增大迅速衰减,因此总动能谱的衰减主要由旋转动能谱的减小造成。

(3) 流函数、势函数、非平衡位势高度的水平相关特征尺度整体上呈现出随波数增大而减小、随高度升高而增大的特征。比湿的水平相关尺度随高度变化很小,主要随波数增大而减小。

(4) 将谱方法和格点方法计算得到的水平相关特征尺度进行比较发现,2种方法计算得到的水平相关特征尺度随高度的变化趋势基本一致,谱方法计算得到的水平相关特征尺度数值偏大。

GRAPES 全球模式背景误差协方差的水平结构特征与其它模式或其他文献中的结果在较大尺度范围是一致的,由于模式本身对较小尺度波动的描述不够准确,其背景误差协方差的水平结构特征必然也存在一定误差,但本文并未对该部分的误差大小及产生原因进行分析,这将是后续的研究重点。同时,背景误差的功率谱在不同的尺度范围(波数范围)体现出不同的特征,水平相关特征尺度随高度也是变化的,因此如何设计出体现大气多尺度特性的背景误差协方差将会对提高模式的预报能力产生重要影响。

参考文献

- [1] 王晓丽,赵桂香,李芳. 山西一次区域性暴雨过程的 ATOVS 资料同化模拟分析[J]. 干旱气象,2016,34(3):522-532.
- [2] 段华,潘晓滨,臧增亮,等. 基于 GSI 同化系统的卫星辐射率资料的同化试验[J]. 干旱气象,2015,33(6):895-901.
- [3] Lorenc A C. Analysis methods for numerical weather prediction[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1986,112(474):1177-1194.
- [4] Bannister R N. A review of forecast error covariance statistics in atmospheric variational data assimilation. I: Characteristics and measurements of forecast error covariance[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2008,134(637):1951-1970.
- [5] 庄世宇,薛纪善,朱国富,等. GRAPES 全球三维变分同化系统——基本设计方案与理想试验[J]. 大气科学,2005,29(6):872-884.
- [6] Rabier F, McNally A, Andersson E, et al. The ECMWF implementation of three-dimensional variational assimilation (3D-Var). II: Structure functions[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1998,124:1809-1829.
- [7] Parrish D F, Derber J C. The national meteorological center's spectral statistical-interpolation analysis system[J]. Monthly Weather Review, 1992,120:1747-1763.
- [8] Rutherford I D. Data assimilation by statistical interpolation of forecast error field[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1972(29):809-815.
- [9] Hollingsworth A, Lönnberg P. The statistical structure of short-range forecast errors as determined from radiosonde data, Part I: The wind field[J]. Tellus Series A - dynamic Meteorology and Oceanography, 1986,38A(2):111-136.
- [10] Lönnberg P, Hollingsworth A. The statistical structure of short-range forecast errors as determined from radiosonde data. Part II: The covariance of height and wind errors[J]. Tellus Series A - dynamic Meteorology and Oceanography, 1986,38A(2):137-161.
- [11] Xu Q, Li W. Estimation of three-dimensional error covariances. Part I: Analysis of height innovation vectors[J]. Monthly Weather Review, 2001,129:2126-2135.
- [12] 龚建东. 资料同化中二维特征长度随模式分辨率变化的分析研究[J]. 大气科学,2007,31(3):459-467.
- [13] 王金成,庄照荣,韩威,等. GRAPES 全球变分同化背景误差协方差的改进及对分析预报的影响:背景误差协方差三维结构的估计[J]. 气象学报,2014,72(1):62-78.
- [14] 王亚华,臧增亮,潘晓斌,等. 高分辨率 GRAPES-GFS 的动能谱及其转折特征分析[J]. 气象学报,2015,73(5):965-974.
- [15] 王亚华,何宏让,臧增亮,等. GRAPES 全球模式的动能谱分析[J]. 干旱气象,2015,33(2):220-226.
- [16] 陈德辉,薛纪善,杨学胜,等. GRAPES 新一代全球/区域多尺度统一数值预报模式总体设计研究[J]. 科学通报,2008,53(20):2396-2407.
- [17] 薛纪善,陈德辉. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用[M]. 北京:科学出版社,2008:230-298.
- [18] 张人禾,沈学顺. 中国国家级新一代业务数值预报系统 GRAPES 的发展[J]. 科学通报,2008,53(20):2393-2395.
- [19] Koshyk J N, Hamilton K. The horizontal kinetic energy spectrum and spectral budget simulated by a high-resolution troposphere-stratosphere-mesosphere GCM[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2001(58):329-348.
- [20] Daley R. Atmospheric Data Analysis[M]. New York:Cambridge University Press, 1991:457.
- [21] Wu W S, Rurser R J, Parrish D F. Three-dimensional variational analysis with spatially inhomogeneous covariances[J]. Monthly Weather Review, 2002,130(12):2905-2916.

Horizontal Structural Characteristics Analysis of Global GRAPES Model Background Error Covariance

WANG Yahua, YANG Xiaofan, ZENG Yonghu, WANG Liandong

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang 471000, China)

Abstract: Based on GRAPES - Global model forecast data in one month, the statistics of background error covariance of GRAPES - Global model was done by using NMC method. The spectrum curve and horizontal correlation characteristic scale of background error covariance were calculated and analyzed. Compared the results of GRAPES with ECMWF, the rotational kinetic energy spectrum, divergent kinetic energy spectrum, total kinetic energy spectrum and geopotential height power spectrum increased gradually when wavenumber ranged from 1 to 7, and they reached maximum when wavenumber ranged from 7 to 14, then decreased slowly with increasing of wavenumber. The calculation values of GRAPES and ECMWF were also very close when wavenumber was less than 60. Meanwhile, the horizontal correlation characteristic scales were calculated separately by using spectral method and grid method, and results of both methods show that the horizontal correlation characteristic scales of background error increased with height and decreased with wavenumber, but calculation values of spectral method were larger than those of grid method.

Key words: GRAPES - Global model; background error power spectrum; horizontal correlation characteristic scale