

夏雪,林嘉妮,高雅隽,等. 2017. 江西区域多元变量背景误差协方差特征分析[J]. 气象与减灾研究,40(3):193-199.
Xia Xue, Lin Jiani, Gao Yajun, et al. 2017. The analysis of multivariate background error covariance in Jiangxi province[J].
Meteorology and Disaster Reduction Research,40(3):193-199.

江西区域多元变量背景误差协方差特征分析

夏雪¹, 林嘉妮², 高雅隽¹, 孟德明³

1. 江西省气象灾害防御技术中心, 江西 南昌 330096
2. 德安县气象局, 江西 九江 332000
3. 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044

摘要: 江西省暴雨灾害频繁发生,改善同化系统性能是提高数值天气预报水平的有效手段,构建合理的背景误差协方差是做好资料同化的关键工作。基于 WRF 模式的江西区域一个月控制预报为样本,计算得到多元变量相关的背景误差协方差,分析其平衡约束特征、特征值、特征向量以及特征长度尺度。结果表明,江西区域模式层中的低层和高层风场辐合、辐散分量的作用更大,各个变量对水汽场的贡献也集中在低层和高层,其中温度场起主导作用;模式层高层温度场的模拟效果偏差,各个变量的垂直相关性较大;相较于风场,温度场和水汽场在水平方向影响范围小,具有较强的局地性。

关键词: 资料同化,背景误差协方差,WRF 模式,江西

中图分类号: P456

文献标识码: A

文章编号: 1007-9033(2017)03-0193-07

doi: 10.12013/qxyjzj2017-030

The Analysis of Multivariate Background Error Covariance in Jiangxi Province

Xia Xue¹, Lin Jiani², Gao Yajun¹, Meng Deming³

1. Jiangxi Provincial Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Nanchang 330096, China
2. De'an County Meteorological Bureau, Jiujiang 332000, China
3. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, NUIST, Nanjing 210044, China

Abstract: Heavy rainstorms occurred frequently in Jiangxi province. Ameliorated performance in the assimilation system was an effective way to improve the numerical weather prediction (NWP). A reasonable background error covariance (BE) modeling was significant to obtain a good data assimilation result. The multivariate background error covariance (MBE) was calculated based on the one-month forecast in Jiangxi province, and the major parameters of BE, such as correlation coefficients, eigenvalues, eigen-vectors and eigen-length scales were compared and analyzed. Results indicated that the convergence and divergence of wind field played a more important role at bottom and top of the model, where each variable made a significant contribution to the water vapor field, especially the temperature field. In addition, the temperature field simulation at the top of model was not satisfactory and the vertical correlation among each variable was relatively strong. The influence of temperature and water vapor field was smaller than that of wind field in the horizontal lengthscales, which presented strong local features.

Key words: data assimilation; background error covariances; the Weather Research and Forecasting model; Jiangxi region

收稿日期: 2017-04-07; 修订日期: 2017-08-24.

基金项目: 2017年江西省气象局青年人才培养项目“背景误差协方差平衡约束在江西省暴雨预报中的适用性研究”.

作者简介: 夏雪, 硕士, 助理工程师, 主要从事资料同化与数值天气预报研究, E-mail: 15861829233@163.com.

0 引言

数值天气预报的准确性依赖于大气的初始值,而资料同化可以为数值天气预报提供一个与大气“真实状态”更为接近的初值。资料同化方法从最初的逐步订正法和最优插值法发展到现在的三维变分法、四维变分法、卡尔曼滤波法和混合同化方法等(Barker et al,2004;Wang et al,2008),其中三维变分法便于处理卫星、雷达等非常规观测资料,并且计算效率高,因此在业务中得到广泛应用(龚建东等,2006a,2006b;曹小群等,2008)。在资料同化过程中,各个变量背景误差协方差的数值直接决定观测资料的利用率,即决定观测场的权重,从而直接影响分析场的质量,因此合理构造背景场误差协方差矩阵是做好资料同化的关键工作和重点研究问题(Dance,2004;Bannister,2008;Berre and Desroziers,2010)。

变分同化系统常采用控制变量转换法(Control Variable Transforms,CVT)来构建背景误差协方差矩阵,其中包含了水平变换、垂直变换和物理变换法(Derber and Bouttier,1999)。在控制变量转换过程中,通过建立数值预报系统中各个变量的平衡关系,使得同化系统具有动力学特征。不同变量间可以通过平衡约束相互作用、影响,因此在构建背景场误差协方差信息时,变量间的平衡约束关系是重要环节。早期的同化系统一般只考虑了旋转风、地面气压和温度之间的平衡关系,未考虑散度风的作用,且很多同化系统的湿度是作为单变量进行分析的,未建立其与其他变量之间的相关关系(Parrish and Derber,1992;Lorenc et al,2000)。近些年,随着数值预报模式的发展和进步,国内外学者开始开展散度风、旋转风与质量场的动力学约束关系,以及湿度变量与其他控制变量的平衡约束关系的研究,通过建立多元变量背景误差协方差,分析各变量在资料同化过程中的作用及对数值模式预报效果的影响(Chen et al,2013;Pu et al,2016)。

国内外学者从平衡特征、特征值、特征向量以及特征长度尺度着手,开展了不同区域、不同天气条件下背景误差协方差的基本特征研究。如,陈耀登等(2015)研究发现,高原和平原地区的背景误差协方差的区域性特征不同,观测资料的权重不同,不同变量的观测信息在资料同化过程中的利用率也不同。不同季节背景误差协方差的平衡贡献特征及其对当季天气过程的作用也同样有差别,其中各个变量对

水汽场的贡献特征区别较为明显(范水勇等,2006;Chen et al,2016)。由此可见,不同区域、天气条件背景下,各个变量之间的相关性不同,不同变量观测信息的权重和影响范围也不同。

江西省位于长江中游以南的鄱阳湖流域,暴雨灾害频繁发生,造成严重的人员伤害和经济损失,如何有效提高江西省数值天气预报水平值得进一步探讨(孙素琴等,2016)。WRFDA(Data Assimilation system for the Weather Research and Forecasting model)系统除了考虑散度风和旋转风与非平衡温度和表面气压的平衡约束关系,还加入了湿度变量与其他控制变量的平衡约束关系,从而更好地表达这些平衡约束关系在资料同化过程中的作用,进而改善同化系统性能,以提高江西省区域性暴雨预报的准确性。文中以WRFDA系统中的多元变量背景误差协方差计算模型为基础,分析了江西省域背景误差协方差特征,以期为资料同化工作提供参考。

1 试验方案

主要研究区域为江西省及周边区域(图1),由于研究区域较小,样本误差无法包含大尺度的信息,因此采用双重嵌套。外层为内层(研究区域)提供一定的大尺度信息,使用的预报样本是内层的预报结果。模式的中心位置为(116°E,27.5°N);外层水平分辨率为9 km,内层为3 km;外层网格点为240×200,内层为250×271;顶层气压为50 hPa;底层气压为1 000 hPa,垂直层为41层;时间步长为40 s。预报模式采用的是WRF(Weather Research and Forecasting model)(ARW)3.5.1版,模式的外层

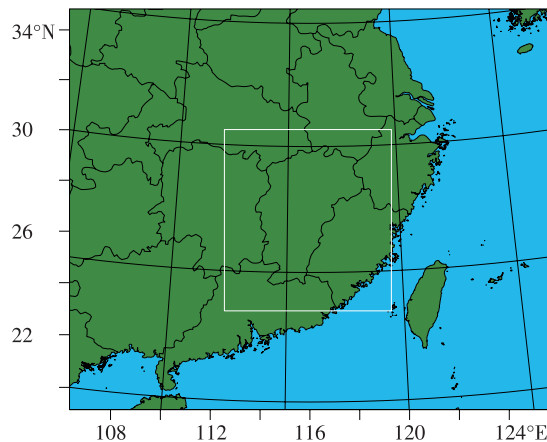


图1 实验区域(白色方框内为研究区域)
Fig. 1 Geographical region (the white box is the study area)

和内层选取相同的参数化方案,包括 Thompson 微物理过程方案、Noah 陆面过程方案、Tiedtke 积云对流参数方案、YSU 边界层方案、RRTMG 短波辐射和 RRTMG 长波辐射方案。初始条件和边界条件为 NCEP 的 GFS(Global Forecast System)再分析资料。

计算背景误差协方差的预报样本为 2016 年 6 月 14 日 00 时—7 月 15 日 00 时(UTC)WRF 模式预报结果,每 6 h 分别进行未来 12 h 和 24 h 预报,共得到 123 组样本预报结果,然后利用 WRFDA 系统的计算模型来计算背景误差协方差。

2 多元变量背景场误差协方差计算

WRFDA 系统采用控制变量转换法来构造背景场误差协方差矩阵,其动力学平衡约束通过变量间的回归统计方法实现。WRFDA 系统有三种控制变量计算选项,即三种不同的回归系数计算方法,分别为:1) 默认的计算模型(CV5 选项);2) 加入了速度势相关和水汽相关的背景场误差协方差模型(CV6 选项);3) 将控制变量流函数(ψ)和势函数(χ)替换为经向风(u)和纬向风(v)的背景误差协方差计算模型(CV7 选项)。目前,常用的背景误差协方差计算模型是 CV5 和 CV6,文中主要对比研究 CV5 和 CV6 选项得到的背景误差协方差在江西区域的特

$$\chi_u(i, j, k) = \chi(i, j, k) + \alpha_{\psi\chi}(i, j, k)\psi(i, j, k) \quad (5)$$

$$T_u(i, j, k) = T(i, j, k) - \sum_{l=1}^{N_k} \alpha_{\psi T}(i, j, k, l)\psi(i, j, l) - \sum_{l=1}^{N_k} \alpha_{\chi_u T}(i, j, k, l)\chi_u(i, j, l) \quad (6)$$

$$p_{su}(i, j) = p_s(i, j) - \sum_{l=1}^{N_k} \alpha_{\psi r_h}(i, j, l)\psi(i, j, l) - \sum_{l=1}^{N_k} \alpha_{\chi_u p_s}(i, j, l)\chi_u(i, j, l) \quad (7)$$

$$r_{hu}(i, j, k) = r_h(i, j, k) - \sum_{l=1}^{N_k} \alpha_{\psi r_h}(i, j, k, l)\psi(i, j, l) - \sum_{l=1}^{N_k} \alpha_{\chi_u r_h}(i, j, k, l)\chi_u(i, j, l) - \sum_{l=1}^{N_k} \alpha_{T_u r_h}(i, j, k, l)T_u(i, j, l) - \alpha_{p_{su} r_h}(i, j, k)p_{su}(i, j) \quad (8)$$

由式(1)–(8)(Chen et al, 2013)可知, CV5 和 CV6 选项计算背景误差协方差的区别在于对风场变量和相对湿度变量的处理。CV5 选项未考虑散度风对质量场的影响,且对湿度采用单变量的处理方式; CV6 选项综合考虑了旋转风和散度风对质量场的影响,且增加了拟相对湿度和其他控制变量的平衡相关关系。因此,选择 CV6 选项计算背景误差协方差时,新的相关关系使得温度和表面气压观测信息可以通过其平衡部分的贡献直接影响速度势场和风场的散度场,拟相对湿度与其他控制变量之间的平衡关系使水汽观测信息可以作用于风场、温度

场和表面气压场。反之亦然,风场的观测信息同样可以通过平衡约束关系直接影响温度场和表面气压场,其他控制变量的观测信息也可以作用于水汽场。

$$\chi_u(i, j, k) = \chi(i, j, k) + \alpha_{\psi\chi}(i, j, k)\psi(i, j, k) \quad (1)$$

$$T_u(i, j, k) = T(i, j, k) - \sum_{l=1}^{N_k} \alpha_{\psi T}(i, j, k, l)\psi(i, j, l) \quad (2)$$

$$p_{su}(i, j) = p_s(i, j) - \sum_{l=1}^{N_k} \alpha_{\psi p_s}(i, j, l)\psi(i, j, l) \quad (3)$$

$$r_h = r_h \quad (4)$$

其中,流函数 ψ 、非平衡速度势 χ_u 、非平衡温度 T_u 、非平衡气压 p_{su} 和拟相对湿度 r_h 为控制变量; i 、 j 分别为各垂直层上的纬向和经向格点, k 和 l 表示垂直层; α_{AB} 表示变量 A 和变量 B 的平衡回归系数,例如 $\alpha_{\psi\chi}$ 表示流函数与势函数间的平衡回归系数; 下标 u 表示非平衡变量。等式左边为模式的控制变量,等式右边的第一项为模式的分析变量,第二项为模式控制变量的平衡部分。

基于 CV6 选项的背景误差协方差计算模型是在 CV5 选项的基础上加入了 6 个新的平衡回归系数,即 $\alpha_{\chi_u T}$ 、 $\alpha_{\chi_u p_s}$ 、 $\alpha_{\psi r_h}$ 、 $\alpha_{\chi_u r_h}$ 、 $\alpha_{T_u r_h}$ 和 $\alpha_{p_{su} r_h}$, 因此拟相对湿度控制变量不再是 r_h , 而是其非平衡部分 r_{hu} , 计算表达式为:

$$\chi_u(i, j, k) = \chi(i, j, k) + \alpha_{\psi\chi}(i, j, k)\psi(i, j, k) \quad (5)$$

$$T_u(i, j, k) = T(i, j, k) - \sum_{l=1}^{N_k} \alpha_{\psi T}(i, j, k, l)\psi(i, j, l) - \sum_{l=1}^{N_k} \alpha_{\chi_u T}(i, j, k, l)\chi_u(i, j, l) \quad (6)$$

$$p_{su}(i, j) = p_s(i, j) - \sum_{l=1}^{N_k} \alpha_{\psi r_h}(i, j, l)\psi(i, j, l) - \sum_{l=1}^{N_k} \alpha_{\chi_u p_s}(i, j, l)\chi_u(i, j, l) \quad (7)$$

$$r_{hu}(i, j, k) = r_h(i, j, k) - \sum_{l=1}^{N_k} \alpha_{\psi r_h}(i, j, k, l)\psi(i, j, l) - \sum_{l=1}^{N_k} \alpha_{\chi_u r_h}(i, j, k, l)\chi_u(i, j, l) - \sum_{l=1}^{N_k} \alpha_{T_u r_h}(i, j, k, l)T_u(i, j, l) - \alpha_{p_{su} r_h}(i, j, k)p_{su}(i, j) \quad (8)$$

场和表面气压场。反之亦然,风场的观测信息同样可以通过平衡约束关系直接影响温度场和表面气压场,其他控制变量的观测信息也可以作用于水汽场。

3 多元变量相关背景误差协方差特征分析

3.1 平衡约束特征

各个变量之间的平衡约束关系通过回归分析方法得到,模式的全场变量可分离为平衡和非平衡两部分,其中平衡部分为变量间的平衡约束关系(Chen et al, 2013)。

图 2 给出了模式变量平衡部分的速度势、温度、

表面气压和湿度场对模式控制变量的贡献。分析图 2a 发现,流函数对速度势的贡献较小,在近地面出现极大值,但仍小于 10%,随着模式层的增加呈波浪式减小,这表明江西省 6—7 月天气系统不稳定。由非平衡速度势和流函数对温度场的贡献(图 2b)可得,非平衡速度势对温度场的贡献要大于流函数,在模式低层和高层更为明显,这说明无旋的散度风对温度场的影响更大。非平衡速度势和流函数对

温度场的总贡献在模式高层更为明显,达到 60%,说明风场在对流层中层对温度场的作用较大。分析非平衡速度势和流函数对表面气压场的贡献(图 2c)可知,与二者对温度场的贡献相似,但非平衡速度势对温度场的贡献更大。由图 2d 可知,各个变量对相对湿度场的贡献较大,主要集中在模式的低层(20 层以下)和顶层(32 层以上),总贡献在低层为 60%左右,其中温度场在各个变量场中起主导作用。

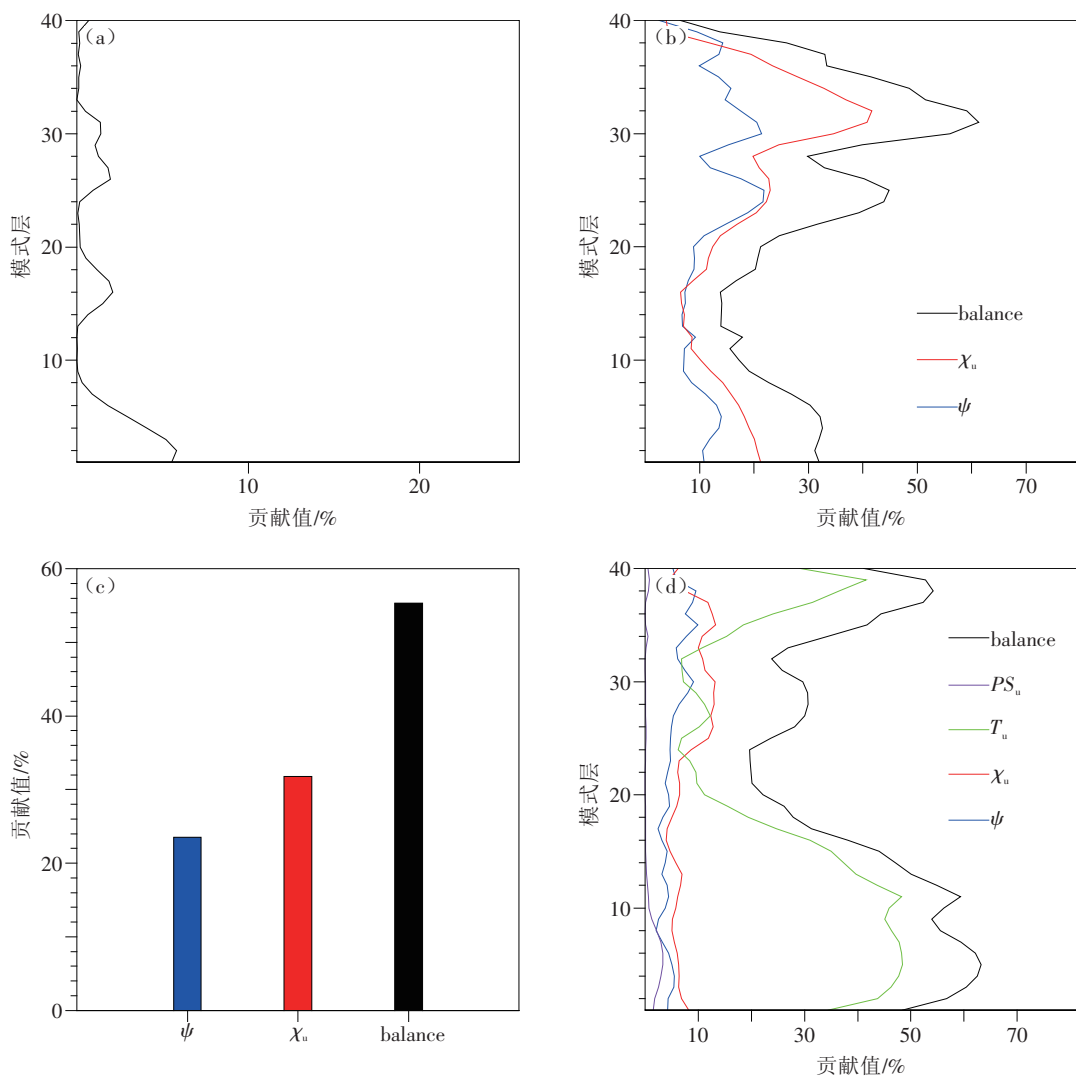


图 2 模式控制变量平衡部分的速度势场(a)、温度场(b)、表面气压场(c)和湿度场(d)对模式控制变量的贡献(ψ 为流函数, balance为平衡部分总贡献, χ_u 为非平衡速度势, p_{su} 为非平衡气压, T_u 为非平衡温度;图中的黑色线表示贡献的总场)

Fig. 2 The contributions to the control variables from the balanced part of potential function variable (a), temperature field (b), surface pressure field variable (c) and relative humidity field variable (d) (ψ is the stream function, balance means the total contributions, χ_u is unbalanced velocity potential, p_{su} is unbalanced pressure, T_u is unbalanced temperature)

3.2 特征值

经验正交函数(EOF)是模式系统常用的计算

各个变量之间垂直相关性的方法(陈耀登等,2015),可用特征值和特征向量来反映各个变量在垂直层上

的分布特征。

图3为流函数、非平衡速度势、非平衡温度和拟相对湿度4个变量的特征值随模式层的变化曲线。分析可得,4个分析变量的特征值与模式层的变化特征相似,均随模式层的增加迅速减小,其中风场和水汽场的特征值在模式层第20层后逐步趋于0,而温度场的特征值是在模式层第30层后逐步趋于0,

说明温度场相比于风场和水汽场在垂直方向的离散性更大。背景误差协方差特征值的大小可以表征模式模拟误差(Chen et al,2013),即反映模式对江西区域温度场的模拟偏差。由图3a、b可知,风场的旋转风分量场的特征值比散度风分量场的大,说明模式对风场散度风分量的模拟相对更准确。

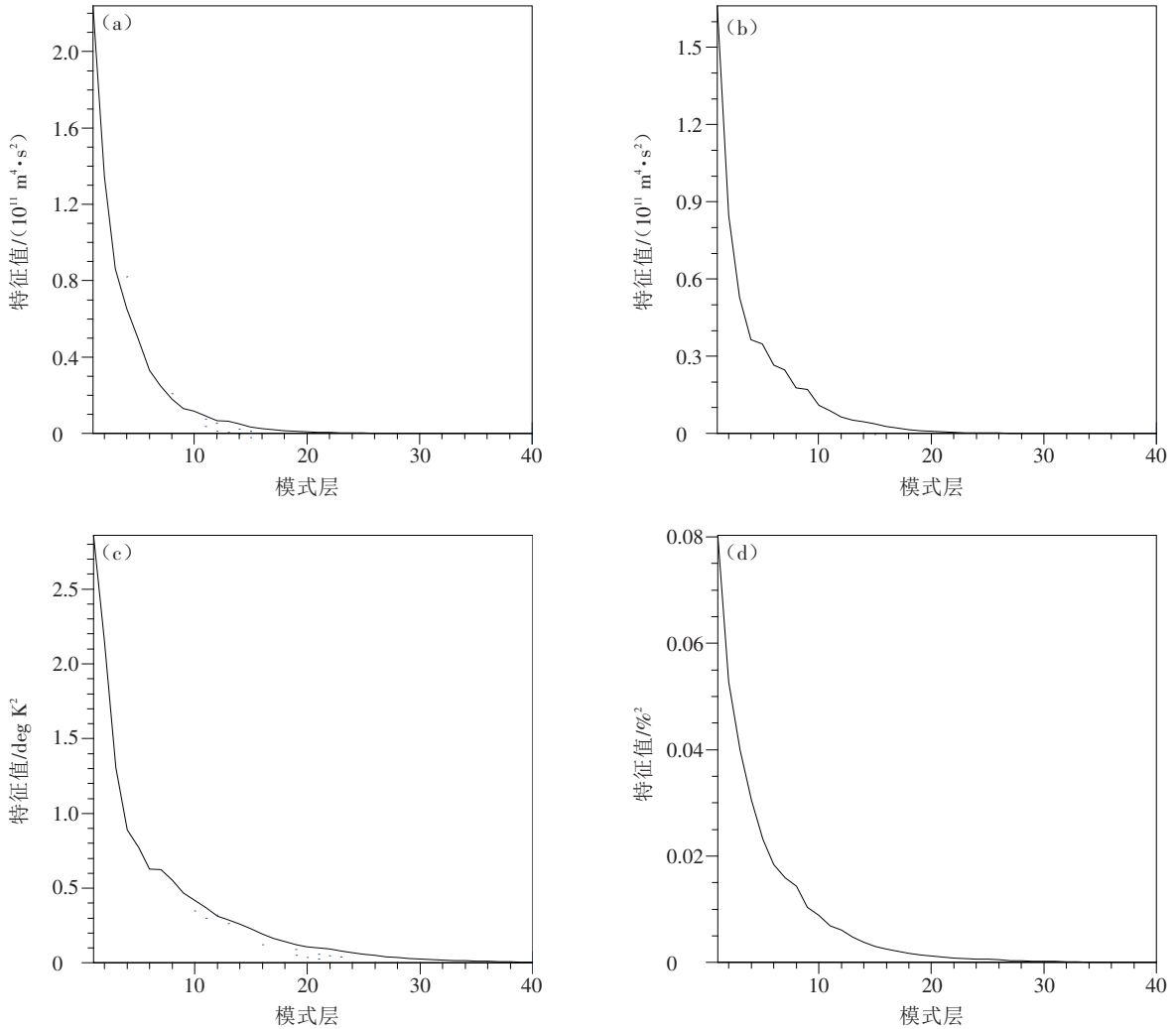


图3 流函数(a)、非平衡速度势(b)、非平衡温度(c)和相对湿度(d)的特征值随模式层的分布

Fig. 3 Distribution of eigenvalues for the stream function (a), the unbalanced velocity potential function (b), the unbalanced temperature field (c) and relative humidity field (d) on the model layer

3.3 特征向量

通过计算背景误差协方差的垂直变换,得到各个变量在各个模态上的特征向量。由于第一特征向量是主要模态,可以直接反映背景误差协方差在垂直方向上的主要特征。图4给出各个变量的第一特征向量在垂直高度上的分布情况。分析可知,在模式层第30层以下,温度场的特征向量值近乎为0,其极值出现在模式层高层,与图2中温度场的特征

值在模式层第30层后逐步趋于0的特征相对应,说明在模式层高层对温度场的模拟较差。风场的旋转和辐合辐散分量场、水汽场在模式层中层出现极值,说明模式对中层风场和水汽场的模拟能力也不足,这导致 WRFDA 系统计算得到的温度场在高层误差较大,风场和水汽场在中层的误差较大。

在模式层0—14层和36层以上,风场的辐合、辐散分量场和拟相对湿度场特征向量值近乎为0,

这可能是由于地表风的辐合、辐散场和水汽分布随着高度变化较小,模式高层风的辐合、辐散很小,以及水汽含量极少导致的。

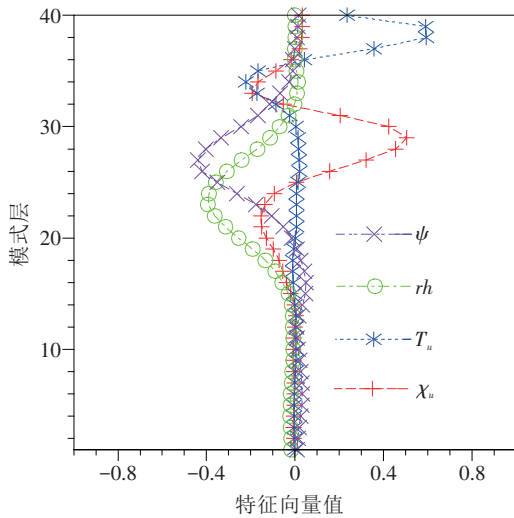


图4 流函数 ψ 、相对湿度 r_h 、非平衡温度 T_u 和非平衡速度势 χ_u 的特征向量随模式层分布

Fig. 4 Distribution of eigenvectors for the stream function ψ , relative humidity field variable r_h , the unbalanced temperature field T_u and the unbalanced velocity potential function χ_u on the model layer

3.4 特征长度尺度

在 WRFDA 系统中,水平变换可以有效地减弱分析变量(模式分析变量的非平衡部分)因模式分辨率的不同而产生的差异,其具体的操作是对各变量进行递归滤波,从而加强变量的水平相关性。特征长度尺度体现了观测场和背景场差异的影响范围,同时也反映资料同化过程中观测信息的影响范围。图 5 给出了分析变量在模式层上的水平特征长度尺度分布。分析发现,模式层 0—40 层风场的水平尺度远大于温度和水汽场,是地表的 4—5 倍。4 个分析变量的长度尺度在垂直方向上的变化趋势相似,均随模式层的增加而减小,说明分析变量的影响范围随着模式层的增加而减小,且风场的旋转分量和辐合、辐散分量的影响范围比温度和相对湿度大。模式变量在地表的水平尺度较大,而模式高层的水平尺度较小,说明在同化过程中,模式变量观测信息的权重随着模式层的增加而减小。风场在模式中低层观测信息的影响要远大于温度场和水汽场,说明温度场和相对湿度场具有较强的局地性。

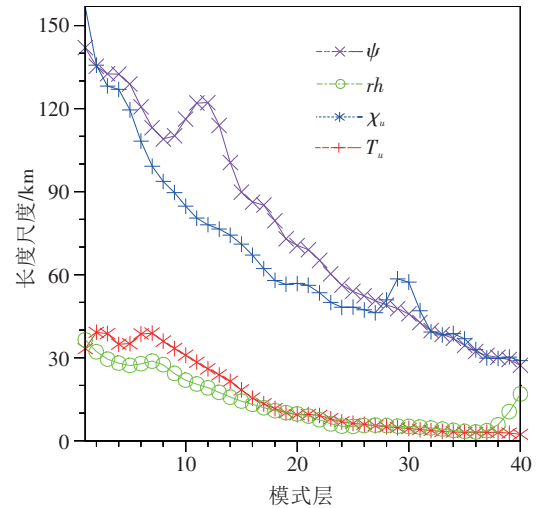


图5 流函数 ψ 、相对湿度 r_h 、非平衡速度势 χ_u 和非平衡温度 T_u 的水平特征长度尺度随模式层分布

Fig. 5 Distribution of horizontal length-scale for the stream function ψ , relative humidity field variable r_h , the unbalanced potential function variable χ_u and the unbalanced temperature field T_u on the model layer

4 结论与讨论

背景误差协方差的结构特征及其数值大小影响资料同化过程中观测信息在各个变量之间的相互作用。因此,构造一个合理的背景误差协方差对于资料同化来说十分重要。文中以江西区域一个月的模式控制预报为样本,利用 WRFDA 系统中 CV6 选项计算背景场误差协方差,从背景误差协方差的平衡约束特征、特征值、特征向量和特征长度尺度四个方面,具体分析了背景误差协方差在江西区域的动力学特征以及水平和垂直方向的相关性,从而了解其在江西区域的适用性,研究发现:

1) 在模式层低层和高层,风的辐合、辐散分量场对温度场的作用要大于风的旋转分量场,且风场对温度场的作用集中在模式中高层;对于水汽场,各个控制变量在模式低层和高层的贡献均比较明显,并且温度场相比于风场和气压场贡献更大,起主导作用。

2) 模式变量的特征值随着模式层的增加迅速减小,其中温度场在垂直方向的离散性较大,说明模式对江西区域温度场的模拟效果偏差,使计算得到的温度场背景误差较大。模式变量的特征向量值在模式层低层基本为 0,而极值出现在模式层的中高

层,说明在低层各变量的垂直相关性很小,到模式层中层后,随着模式层的增加,模式变量的观测信息对高度的敏感性增大,这可能是造成高层模拟效果差的原因之一。

3) 风场在水平方向的影响范围要远远大于温度场和水汽场,说明对于江西区域的资料同化来说,风场的观测信息在水平方向的权重要比温度场和水汽场大,体现了温度场和水汽场较强的局地性。

文中只讨论了特征向量的第一模态,后期将讨论其他模态的分布和作用。江西区域的降水以锋面降水和台风降水为主,主要集中在汛期和台风旺盛期。并且,只初步分析了汛期江西区域背景误差协方差的基本特征,后期将重点对比分析汛期和台风旺盛期的特征,从动力学的角度重点分析背景误差协方差的平衡约束关系对锋面降水和台风降水预报的影响。

参考文献 (References)

- Bannister R N. 2008. A review of forecast error covariance statistics in atmospheric variational data assimilation I: Characteristics and measurements of forecast error covariances[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 134(637):1951-1970.
- Barker D M, Huang W, Guo Y R, et al. 2004. A three-dimensional variational data assimilation system for MM5 [J]. *Mon Wea Rev*, 132(4):897-914.
- Berre L, Desroziers G. 2010. Filtering of background error variances and correlations by local spatial averaging: A review[J]. *Mon Wea Rev*, 138(10):3693-3720.
- Chen Y, Rizvi S R, Huang X Y, et al. 2013. Balance characteristics of multivariate background error covariances and their impact on analyses and forecasts in tropical and Arctic regions[J]. *Meteor Atmos Phys*, 121(1):79-98.
- Chen Y, Xia X, Min J, et al. 2016. Balance characteristics of multivariate background-error covariance for rainy and dry seasons and their impact on precipitation forecasts of two rainfall events [J]. *Meteor Atmos Phys*, 128(5):579-600.
- 曹小群,黄思训,张卫民,等. 2008. 区域三维变分同化中背景误差协方差的模拟[J]. *气象科学*, 28(1):8-14. Cao X C, Huang S X, Zhang W M, et al. 2008. Modeling background error covariance in regional 3DVAR[J]. *Scientia Meteor Sinica*, 28(1):8-14. (in Chinese)
- 陈耀登,赵幸,闵锦忠,等. 2015. 青藏高原和华东地区背景误差协方差特征的对比研究[J]. *大气科学学报*, 38(5):650-657. Chen Y D, Zhao X, Min J Z, et al. 2015. Comparative analysis of characteristics for background error covariances in East-China and Plateau region[J]. *Trans Atmos Sci*, 38(5):650-657. (in Chinese)
- Dance S L. 2004. Issues in high resolution limited area data assimilation for quantitative precipitation forecasting[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 196(1):1-27.
- Derber J C, Bouttier F. 1999. A reformulation of the background-error covariance in the ECMWF global data assimilation system [J]. *Tellus*, 51(2):195-221.
- 范水勇,张朝林,仲跻芹. 2006. MM5 三维变分系统在北京地区冷暖气背景场误差的对比分析[J]. *高原气象*, 25(5):855-861. Fan S Y, Zhang C L, Zhong J Q. 2006. Contrast analysis of background error of MM5 3DVAR system in cold and warm seasons in Beijing[J]. *Plateau Meteor*, 25(5):855-861. (in Chinese)
- 龚建东,魏丽,陶士伟,等. 2006a. 全球资料同化中误差协方差三维结构的准确估计与应用 I: 观测空间协方差的准确估计[J]. *气象学报*, 64(6):669-683. Gong J D, Wei L, Tao S W, et al. 2006a. Accurate estimate and application of 3-D error covariance structures in global data assimilation. part I: Accurate estimation of error covariance in observation space[J]. *Acta Meteor Sinica*, 64(6):669-683. (in Chinese)
- 龚建东,赵刚. 2006b. 全球资料同化中误差协方差三维结构的准确估计与应用 II: 背景误差协方差调整与数值试验分析[J]. *气象学报*, 64(6):684-698. Gong J D, Zhang G. 2006b. Accurate estimate and application of 3-D error covariance structures in global data assimilation. part II: Background error covariance structure adjustments and numerical experiments[J]. *Acta Meteor Sinica*, 64(6):684-698. (in Chinese)
- Lorenc A C, Ballard S P, Bell R S, et al. 2000. The Met. Office global three-dimensional variational data assimilation scheme [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126(570):2991-3012.
- Parrish D F, Derber J C. 1992. The national meteorological center's spectral statistical-interpolation analysis system[J]. *Mon Wea Rev*, 120(8):1747-1763.
- Pu Z, Zhang S, Wang M, et al. 2016. Influence of the self-consistent regional ensemble background error covariance on hurricane inner-core data assimilation with the GSI-based hybrid system for HWRF[J]. *J Atmos Sci*, 73(12):4911-4925.
- 孙素琴,许爱华,郑婧,等. 2016. 江西省汛期暴雨时空分布及区域性暴雨分区[J]. *气象与减灾研究*, 39(2):90-97. Sun S Q, Xu A H, Zheng J, et al. 2016. The regionalization and spatial-temporal characteristics of the torrential-rain in Jiangxi province during the flood season[J]. *Meteor Disaster Reduction Res*, 39(2):90-97. (in Chinese)
- Wang X, Barker D M, Snyder C, et al. 2008. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part II: Real observation experiments[J]. *Mon Wea Rev*, 136(12):5132-5147.