

集合预报多尺度奇异向量初值扰动方法研究^{*}

叶 璐¹ 刘永柱² 陈 静² 夏 宇³ 王 静⁴

YE Lu¹ LIU Yongzhu² CHEN Jing² XIA Yu³ WANG Jing⁴

1. 中国气象科学研究院, 北京, 100081

2. 中国气象局数值预报中心, 北京, 100081

3. 南京信息工程大学, 南京, 210044

4. 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029

1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2. Numerical Weather Prediction Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

3. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

4. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2019-08-20 收稿, 2020-03-26 改回。

叶璐, 刘永柱, 陈静, 夏宇, 王静. 2020. 集合预报多尺度奇异向量初值扰动方法研究. 气象学报, 78(4): 648-664

Ye Lu, Liu Yongzhu, Chen Jing, Xia Yu, Wang Jing. 2020. A study on multi-scale singular vector initial perturbation method for ensemble prediction. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(4):648-664

Abstract This study aims to further improve the GRAPES(Global Regional Assimilation and Prediction Enhanced System) region ensemble prediction singular vector (SV) initial perturbation method. According to the multi-scale characteristics of atmospheric initial errors, the singular vectors with different spatial resolutions and optimal time intervals are calculated from GRAPES global singular vectors. The linear combination method based on Gaussian distribution is used to construct initial perturbations based on multi-scale singular vectors to represent the fastest growing multi-scale initial errors mode in phase space. The perturbation characteristics and the ensemble prediction effects of the single-scale singular vectors initial perturbation method and multi-scale initial perturbation method are compared by conducting initial perturbation experiments for a case occurred on 19 January 2019. The main conclusions are as follows: The multi-scale singular vector initial perturbation method is able to provide reasonable initial perturbation field for regional ensemble prediction. The magnitude of the perturbation increases with time and the spatial distribution reflects the baroclinic instability of the atmosphere. In addition, multi-scale singular vector perturbations can effectively describe the error characteristics of large scale and small scale motions, and can reflect more uncertain information of initial field than single scale singular vector perturbations. The analysis of experiments results shows that GRAPES multi-scale singular vector ensemble forecast has certain advantages on consistency, CRPS (continuous ranked probability score), outlier score, etc., and its forecasting skills are better than the single-scale singular vector method. Therefore, the multi-scale singular vector initial perturbation method based on GRAPES can improve the forecasting effect of ensemble prediction, and it can provide a scientific evidence and application basis for constructing a complete GRAPES regional singular vector ensemble forecasting system.

Key words Ensemble prediction, Multi-scale initial perturbation, Singular vector

摘要 目前国际上采用的奇异向量集合预报初值扰动法对于初值不确定性的描述存在一定的不足,为了更有效地反映初始误差的时空多尺度特性,基于GRAPES全球奇异向量计算技术,计算了不同空间分辨率及不同最优时间间隔的多个尺度的奇异向

* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2018YFC1507405)。

作者简介: 叶璐,主要从事集合预报研究。E-mail: yelu292589@163.com

通信作者: 刘永柱,主要从事集合预报研究。E-mail: liuyzh@cma.gov.cn

量, 并采用基于高斯分布的线性组合法来构造多尺度奇异向量的扰动初值, 以代表在相空间中增长最快的多尺度初值误差模态。通过2019年1月19日的初值扰动集合预报试验, 对比分析了单一尺度奇异向量初值扰动法与多尺度初值扰动法的扰动特征及集合预报效果。结果表明, 多尺度奇异向量初值扰动法为区域集合预报提供的初始扰动场是合理的, 扰动的大小随时间增长, 且在空间分布上较好地反映了当前大气的斜压不稳定特征。此外, 多尺度奇异向量扰动可以描述一定的大尺度以及中小尺度运动误差特征, 较单一尺度奇异向量扰动能反映出更多初始场的不确定性信息。检验分析表明, GRAPES多尺度奇异向量集合预报在集合一致性、连续等级概率评分、离群值等方面有一定的优势, 相比于单一尺度奇异向量法有较好的预报技巧。因此, 基于GRAPES的多尺度奇异向量初值扰动法对于集合预报的预报效果有一定的提高, 能为构建一套完善的GRAPES区域奇异向量集合预报系统提供一定的科学依据和应用基础。

关键词 集合预报, 多尺度初值扰动, 奇异向量

中图法分类号 P456

1 引言

20世纪以来, 数值天气预报技术被世界各国用于预测未来大气的变化, 已取得了较多的成果。但是, 由于初值的不确定性、模式不确定性以及大气是一个高度非线性系统具有混沌特性等(Lorenz, 1963, 1965; 周秀骥, 2005), 导致了数值预报结果仍存在较大的不确定性(陈静等, 2002; 李泽椿等, 2002)。为了更好地描述这种不确定性, 提出了集合预报技术, 集合预报是定量描述预报不确定性的新一代随机动力预报理论方法(Epstein, 1969; Leith, 1974), 它从一组相关性较弱的初值出发, 得到一组预报结果, 将单一的确定性预报转化为概率预报(杜钧等, 2010), 为预报提供定量的不确定性特征。

集合预报中, 采用初值扰动法来解决初值的不确定性(张涵斌等, 2017), 判断初值扰动法优劣的关键在于初值扰动能否准确地体现初始误差的分布特征及随时间的演变特征(杜钧, 2002)。研究(Zhang, 2019)表明, 初始误差具有多尺度特征, 即存在大尺度、中尺度以及小尺度的初始误差, 且不同尺度误差的大小结构、演变机制以及垂直分布各不相同。强误差增长一般发生在大气中不稳定的区域(Lang, et al, 2010), 且不同尺度初始误差的结构和增长机制主要取决于不同的大气不稳定系统(刘建勇等, 2011), 如天气尺度误差主要受斜压波造成的斜压不稳定影响(Langland, et al, 2002), 中小尺度系统误差主要受湿对流不稳定支配(Zhang, et al, 2002, 2003; Tan, et al, 2004)等。除影响系统外, 不同尺度初始误差对数值预报可预报性的影响也不同。Johnson等(2014)基于风暴尺度集合预报(SSEF)系统研究了不同初值扰动法与预报误差的

多尺度特征, 表明不同尺度初始误差对预报误差有不同的影响, 大尺度初始误差主要影响大尺度预报误差, 小尺度初始误差的空间结构则对中小尺度预报误差有较大的影响, 很小的初始误差也能通过不稳定快速增长从而影响系统的可预报性。此外, 不同尺度误差之间还存在复杂的相互作用, Rabier等(1996)研究发现误差会快速由小尺度向大尺度和高层传播, 大尺度误差也会向小尺度传播(Tribbia, et al, 2004)。针对误差的多尺度特征, 有学者提出了混合尺度初值扰动法, 其主要思想为通过滤波方法来提取并混合全球模式的大尺度扰动信息以及区域模式的中小尺度扰动信息来构造多尺度初值扰动, 对区域集合预报的预报质量有一定提高(Wang, et al, 2011, 2012, 2014; Caron, 2013; Zhang, et al, 2015; 马旭林等, 2018)。综上所述, 大气的可预报性受到不同尺度初始误差相互作用的影响。因此, 如何构造合理的多尺度初值扰动代表初始误差的多尺度特征, 使得初值扰动和初值不确定性之间具有更高的一致性, 对集合预报领域研究具有重要的科学意义(Johnson, et al, 2016)。

在集合预报初值扰动方法中, 奇异向量(SV)初值扰动方法具有完备的数学、物理理论基础, 能产生相空间中随时间增长最快的初值扰动(Buizza, et al, 1995), 是中外常用的集合预报初值扰动方法之一。奇异向量的研究在国际上发展较早, 基于其快速增长的性质, 1992年ECWMF首次将奇异向量应用于生成初值扰动(Molteni, et al, 1996), 1998年又提出了演化奇异向量法, 得到很好的效果(Barkmeijer, et al, 1998)。随后学者们陆续将奇异向量应用于构造预报误差方差矩阵的特征向量(Ehrendorfer, et al, 1997)、适应性观测(Palmer, et al, 1998; Kim, et al, 2009)、热带气旋的演化研究(Peng, et

al, 2005; Reynolds, et al, 2001; Lang, et al, 2010) 等, 取得了较多的成果。Magnusson 等(2008)将奇异向量法与增长模繁殖法做比较发现, 除热带地区外, 奇异向量法的表现较好。2010年ECWMF进一步发展了奇异向量结合集合资料同化作为初始扰动法(Buizza, et al, 2008, 2010)。奇异向量的计算是基于模式的切线和伴随技术, 在过去几十年间, 切线性、伴随技术在气象、海洋等领域被广泛地应用, 在集合预报、敏感性分析以及数据同化处理等方面有强大的功能(Errico, et al, 1992; Errico, 1997)。所以, 奇异向量法具有较大的发展潜力, 是现今国际上集合预报系统初值扰动技术研究的重点方向。

奇异向量初值扰动法在中国也有相应的发展(杨学胜等, 2002; 钟科等, 2008)。GRAPES (Global Regional Assimilation and Prediction Enhanced System)是中国新一代全球区域同化预报系统, 该模式采用非静力学方程、高度地形追随坐标、半隐式半拉格朗日时间插分方案(Staniforth, et al, 1991)和Arakawa-C类水平格点分布(陈德辉等, 2008)。2010年, 刘永柱等(2011, 2013)开始研究基于GRAPES_Meso模式的奇异向量初值扰动法, 并验证了其正确性, 随后提出了GRAPES全球模式奇异向量法, 发现奇异向量能体现出中高纬度地区对流层中的斜压不稳定特征, 且能反映预报误差的主要信息, 用来构造集合预报的初值扰动是合理的。为满足四维变分同化和奇异向量集合预报的业务化发展需求, 研究人员(刘永柱等, 2017; 李晓莉等, 2019)基于GRAPES全球模式2.0版发展其切线和伴随模式, 大幅度提高了奇异向量的计算效率和效果, 为GRAPES全球奇异向量集合预报系统于2018年12月业务化运行提供了很好的支撑。因此, 如何进一步利用奇异向量代表初始误差的多尺度特征, 对GRAPES集合预报发展具有重要的应用价值。

由于初始误差具有多尺度特征, 如何利用已在业务中应用的奇异向量构造具有多尺度特征的初值扰动, 更好地表征初始误差的时间演变, 探究更全面反映初始场的不确定信息的集合预报初值扰动方法很有必要。文中基于GRAPES全球切线性模式和伴随模式, 计算不同分辨率的奇异向量, 分

析其尺度代表性, 构造多尺度奇异向量初值扰动, 并进一步将初值扰动引入区域集合预报系统进行集合预报试验, 对比分析单一尺度奇异向量初值扰动法与多尺度奇异向量初值扰动法对初始误差的代表性及集合预报效果, 为构建一套完善的GRAPES区域奇异向量集合预报系统提供一定的科学依据和应用基础。

2 资料和方法

2.1 模式与资料

试验采用GRAPES区域集合预报模式, 模式分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, 模拟时段为2019年1月19—26日共8 d。计算奇异向量以($15^\circ\text{--}65^\circ\text{N}$, $70^\circ\text{--}140^\circ\text{E}$)为目标区, 初始资料为GRAPES全球模式业务的分析场, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

2.2 方案设计

2.2.1 奇异向量计算方案简介

奇异向量反映的是相空间中在最优化时间间隔内增长最快的初值扰动, 在GRAPES模式中计算的预报变量为水平风速分量(u, v)、扰动位温(θ')以及扰动无量纲气压(Π')的初始扰动量, 奇异向量由预报变量的切线性向量组成, 表示为 $x=(u', v', (\theta')', (\Pi')')^T$ 。刘永柱等(2010)基于GRAPES全球切线和伴随模式研究了以总能量模为权重的GRAPES全球奇异向量计算方案, 其主要计算公式为

$$(L^T E L) x_i(t_0) = \lambda_i^2 E x_i(t_0) \quad (1)$$

式中, L 为GRAPES全球切线模式, L^T 为GRAPES全球伴随模式, E 为变换算子即权重模, x_i 为第*i*个奇异向量, λ_i 为其对应的奇异值。变换算子 E 把物理空间上的扰动向量 x 转换为适用于数学算法计算的欧拉空间上的无量纲向量 \hat{x} 来求解,

$$x = E^{-1} \hat{x} \quad (2)$$

$$(E^{-1} L^T E L E^{-1}) \hat{x}_i(t_0) = \lambda_i^2 \hat{x}_i(t_0) \quad (3)$$

总能量公式为

$$E_{\text{total}} = \iiint_V \left(\frac{\rho_r \cos \varphi}{2} (u')^2 + \frac{\rho_r \cos \varphi}{2} (v')^2 + \frac{\rho_r \cos \varphi c_p T_r}{(\theta_r)^2} ((\theta')')^2 + \frac{\rho_r \cos \varphi c_p T_r}{(\Pi_r)^2} ((\Pi')')^2 \right) dV \quad (4)$$

式中, $dV = d\lambda d\varphi d\hat{z}$, λ 和 φ 分别为GRAPES模式球面坐标的经度和纬度, \hat{z} 为地形追随坐标, ρ_r 为参考密

度, T 为参考温度, θ 为参考位温, Π_r 为参考无量纲气压, c_p 为空气定压比热容。

文中基于 GRAPES 全球奇异向量计算方案, 计算了 3 个尺度的奇异向量, 水平分辨率分别选取 0.5° 、 1.5° 、 2.5° , 垂直为 60 层, 线性化物理过程为 MRF 垂直扩散和 MB 地形阻塞流拖曳(刘永柱等, 2019), Lanczos 迭代次数为 40 次, 不同分辨率奇异向量的模式积分步长和最优时间间隔设定如表 1, 多尺度奇异向量指用不同时间间隔计算得到的不同分辨率(0.5° 、 1.5° 、 2.5°)的奇异向量, 分别代表小尺度、中尺度及大尺度的不确定性信息。

表 1 3 个尺度 GRAPES 奇异向量计算配置

Table 1 Calculation configurations of singular vectors in three scales

水平分辨率($^\circ$)	模式积分步长(s)	最优时间间隔(h)
0.5	300	6
1.5	900	24
2.5	1200	48

2.2.2 多尺度奇异向量初值扰动构造方案

奇异向量为相空间上描述分析误差协方差的一组正交向量, 相同分辨率的奇异向量是互相正交的, 但不同分辨率的奇异向量不一定互相正交, 所以组合多尺度奇异向量需要先对不同尺度(k 个)的奇异向量进行施密特正交化, 去掉信息重复的部分, 使得每个奇异向量只反映当前大气状态下某一维的最不稳定性结构, 然后把不同尺度(k 个)的 GRAPES 奇异向量(x_1, x_2, \dots, x_k)基于式(5)进行线性组合。由于大气初始误差大小的分布符合均值为 0、分析协方差为 V 的多变量高斯分布 $N_n(0, V)$, 所以采用的是基于高斯分布的线性组合法, 系数采用标准正态分布矩阵, 对奇异向量进行线性组合生成初始扰动

$$\begin{aligned} p_n &= \beta(x_1/\gamma_1, x_2/\gamma_2, \dots, x_k/\gamma_k)\alpha_n \\ &= \beta \sum_{j=1}^k \alpha_{n,j} \cdot (x_j/\gamma_j) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\alpha_{n,j}$ 为符合高斯分布的随机系数, k 为奇异向量的个数, n 为扰动场的个数, β 为控制系数, γ 为尺度化因子

$$\gamma = \sqrt{\sum_{i=1}^N [(u'_i/e_u)^2 + (v'_i/e_v)^2 + (\theta'_i/e_\theta)^2 + (\Pi'_i/e_\Pi)^2]} \quad (6)$$

式中, N 为模式的格点数, u'_i 和 v'_i 分别为 i 个格点对应的纬向风和经向风的切线性向量, θ'_i 为扰动位温在 i 格点的切线性向量, Π'_i 为扰动 Exner 气压变量在 i 格点的切线性向量, e_u 、 e_v 、 e_θ 、 e_Π 分别为 u 、 v 、 θ 、 Π 的分析误差振幅。

通过不同的随机系数(α_n), 得到 n 个大小合理且能够体现大气初值误差分布特征的多尺度初值扰动场(p_n)。多尺度奇异向量构成集合预报初始扰动场的具体步骤如下: (1) 分别读取 0.5° 、 1.5° 、 2.5° 奇异向量 u 、 v 、 θ 、 Π 的扰动量; (2) 将这些扰动量分别水平插值至模式的分辨率; (3) 对奇异向量进行施密特正交化, 去掉信息重复部分; (4) 将各个尺度扰动量进行线性组合并尺度化, 合并得到 n 个多尺度扰动场(式(5)); (5) 对这 n 个扰动滤去超出分析误差量值较大的个别值, 以保证初值扰动的合理性以及集合预报运行的稳定性, 得到扰动振幅和分布合理的初值扰动场。

2.2.3 集合预报试验方案

将得到的奇异向量初值扰动场引入 GRAPES 区域集合预报中进行连续 8 d 的试验, 集合成员为 14 个, 预报区域为(15° — 65°N , 70° — 140°E), 起报时间为 2019 年 1 月 19 日 00 时(世界时), 预报时效为 60 h, 4 组集合预报的初值扰动场分别是单一尺度奇异向量扰动场及多尺度奇异向量扰动场(表 2)。

表 2 集合预报 4 组初值扰动试验

Table 2 Four sets of initial perturbation experiments for ensemble prediction

试验	初值扰动场
Exp1	0.5° 奇异向量扰动
Exp2	1.5° 奇异向量扰动
Exp3	2.5° 奇异向量扰动
Exp4	多尺度奇异向量扰动

2.2.4 集合预报检验方案

集合预报试验检验资料采用 GRAPES 区域模式的等压面分析场资料, 等压面要素预报检验采用集合一致性(即集合离散度与集合均方根误差的比值)、连续等级概率评分(CRPS)、离群率(施亮星等, 2015; Hersbach, 2000), 评估变量包括 250、500、850 hPa 的位势高度(H)、纬向风速(U)、经向风速(V)以及温度(T)。

3 试验结果分析

3.1 不同尺度奇异向量特征分析

奇异向量的计算优化时间对于所产生的奇异向量增长速率和空间结构有较大影响。奇异向量增长率由奇异值来反映, 理论上优化时间间隔越长, 奇异值越大, 奇异向量增长的幅度越大, 越能充分反映初始场的不确定信息。首先对比分析不同分辨率的前15个奇异向量在同一优化时间间隔(6 h)下的奇异值大小, 由图1可见, 在6 h时间间隔下, 空间分辨率越高, 奇异向量对应的奇异值越大, 其增长得越快, 即小尺度(0.5°)奇异向量对应的奇异值最大, 表明其对应的奇异向量在相空间中前6小时增长得最快, 而大尺度奇异向量增长得最慢, 还需更长的优化时间间隔。

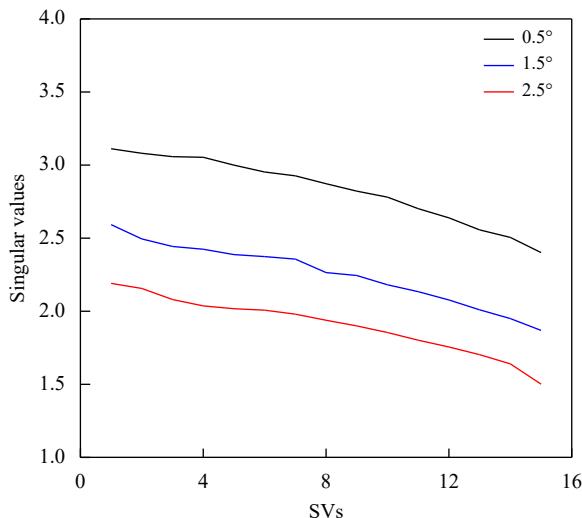


图1 不同分辨率 GRAPES 奇异向量 6 h 时间间隔的奇异值

Fig. 1 Singular values of GRAPES singular vectors at different resolutions at 6 h intervals

不同尺度奇异向量应选取不同的最优时间间隔, 且考虑到计算资源有限, 优化时间间隔不能过长。以 2.5° 奇异向量为例, 图2为其不同时间间隔下前15个奇异向量对应的奇异值分布, 可知48 h优化时间间隔的奇异值均大于其他时间间隔, 且曲线较为陡峭, 说明易于从所有初始误差中提取出增长最快的奇异向量, 而6 h和12 h时间间隔的奇异值曲线较为平缓, 表明难以分离出相空间中增长最快的奇异向量, 因此, 2.5° 奇异向量的最优时间间隔

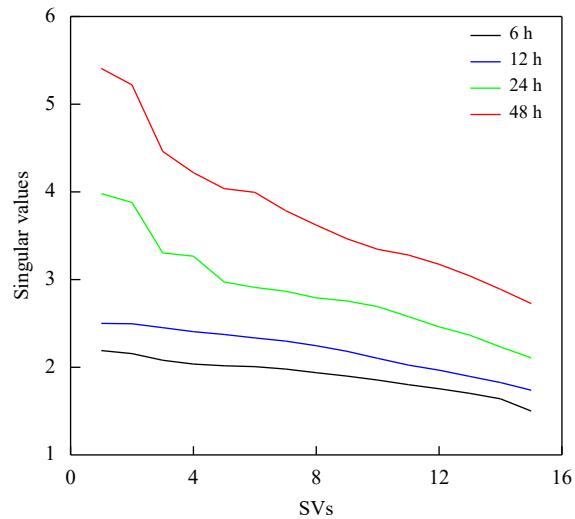


图2 不同时间间隔分辨率 2.5° GRAPES 奇异向量的奇异值

Fig. 2 Singular values of resolution 2.5° GRAPES singular vectors at different time intervals

取为48 h。不同尺度奇异向量应选取与各尺度天气系统生命史相当的时长作为最优时间间隔, 同样, 1.5° 和 0.5° 的奇异向量分别取24和6 h作为最优时间间隔。

图3为不同分辨率的15个GRAPES奇异向量的总能量模垂直分布(百分比), 可以看出, GRAPES奇异向量能量模主要分布在模式第15—35层, 相当于大气对流层。研究表明北半球中高纬度垂直方向上斜压不稳定的区域主要集中在对流层, 能量模的垂直分布与之较为匹配, 所以采用总能量来作为计算奇异向量的模可以在垂直方向上较好地反映中高纬度天气的斜压不稳定特征。图4是不同分辨率奇异向量SV01和SV06的位能(PE)模、动能(KE)模以及总能量(TE)模的垂直分布(百分比), 结合图3不同尺度奇异向量的能量模可知, 大尺度奇异向量能量模的垂直分布较小尺度更为分散, 0.5° 奇异向量能量模中动能占据总能量的绝大部分, 位能所占比重很小, 并且有约4个奇异向量部分捕捉到了大气低层的中小尺度信息; 1.5° 奇异向量能量模垂直分布较 0.5° 更分散, 位能占比显著增加; 2.5° 奇异向量能量模垂直分布更为分散, 位能占比进一步增加。其中 0.5° 奇异向量在高层的能量模分布可能是由于该区域高层存在高风速急流区, 2.5° 奇异向量可能是计算时间间隔相对较长, 非线

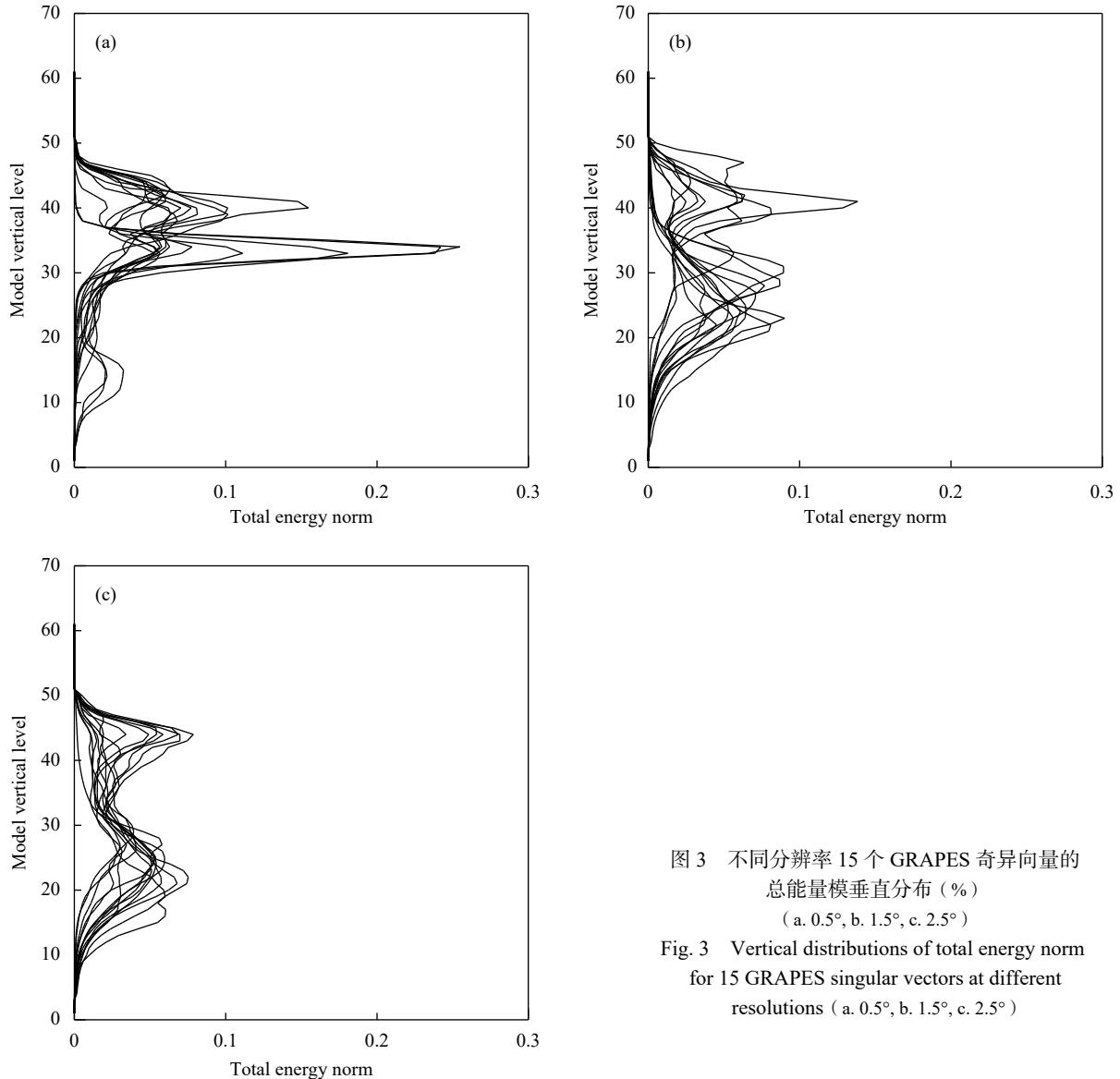


图3 不同分辨率15个GRAPES奇异向量的总能量模垂直分布(%)
(a. 0.5°, b. 1.5°, c. 2.5°)

Fig. 3 Vertical distributions of total energy norm
for 15 GRAPES singular vectors at different
resolutions (a. 0.5°, b. 1.5°, c. 2.5°)

性影响增强,导致了奇异向量虚假的浅层能量模峰值,这与 Barkmeijer 等(2001)的研究结论相似。

有研究(Zhang, et al, 2006)表明,引入相同初值扰动时,冬季天气尺度低压系统的个例敏感性要大于夏季强降水个例,因此本研究选取2019年1月19日00时为例来分析,由500 hPa的位势高度分布图可知,中国西北部地区为一高压脊和低压中心,北部蒙古一带为低压槽,造成北方的降温、降雪天气,西南部一直到孟加拉湾为一南支槽,将水汽向中国南方大部分地区输送,导致南方大范围的降水过程,这些便是斜压不稳定的区域。由于斜压不稳定是中高纬度天气尺度扰动发生、发展的主要机制,所以斜压不稳定的区域也是初值扰动发展最快

的区域。图5为同一优化时间间隔(6 h)下计算得到的不同尺度奇异向量SV01—SV06的水平分布,其中0.5°取模式第15层(约850 hPa),1.5°和2.5°取模式第26层(约500 hPa)。可以看出0.5°奇异向量极值区集中分布在西北部高压脊以及孟加拉湾低压槽地区,包含更多的对流层低层的中小尺度不确定信息,1.5°和2.5°奇异向量较0.5°奇异向量更广泛地分布于不稳定区域,因此大尺度的奇异向量所代表的大尺度不确定信息更多也更广泛。但图5中的不确定信息分布特征并不全面,如贝加尔湖南部地区低压槽处的奇异向量分布并不显著,说明还需取更长的时间间隔来计算1.5°及2.5°的奇异向量,使其进一步增长,才能更准确地代表初始场

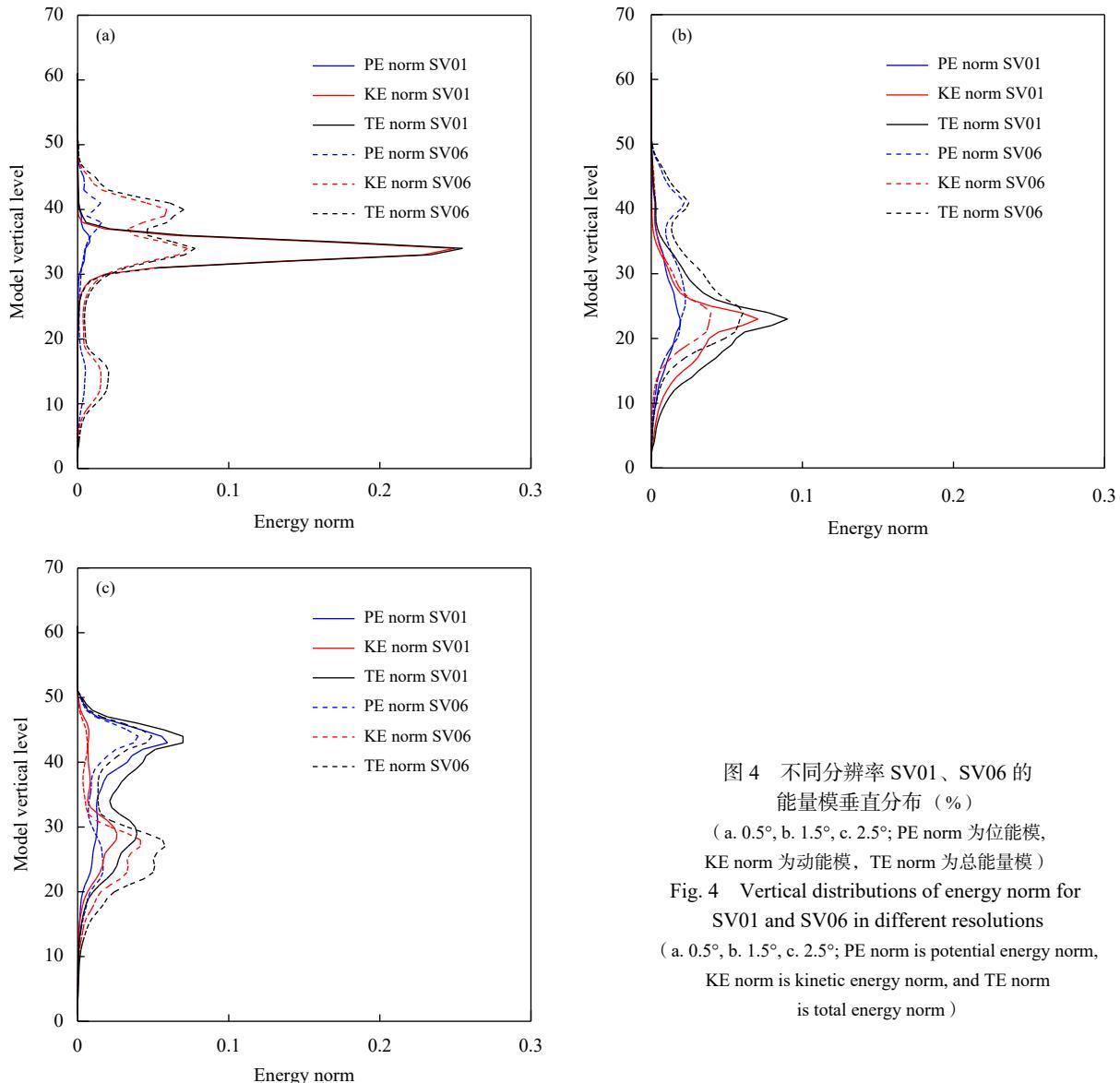


图 4 不同分辨率 SV01、SV06 的能量模垂直分布（%）

(a. 0.5°, b. 1.5°, c. 2.5°; PE norm 为位能模, KE norm 为动能模, TE norm 为总能量模)

Fig. 4 Vertical distributions of energy norm for SV01 and SV06 in different resolutions

(a. 0.5°, b. 1.5°, c. 2.5°; PE norm is potential energy norm, KE norm is kinetic energy norm, and TE norm is total energy norm)

的多尺度不确定信息。

以下对比分析了各最优时间间隔下不同分辨率奇异向量 SV01 和 SV06 在模式第 15 层 (0.5°)、26 层 (1.5° 、 2.5°) 的水平分布特征。与图 5 相比, 图 6 中奇异向量的极值区更完善系统地分布在高压脊、低压槽和低压中心等不稳定区域, 更清晰地反映了此处大气的斜压不稳定特征, 说明该时间间隔下生成的奇异向量更为合理。同时对比不同分辨率的奇异向量, 不同尺度奇异向量突出的不确定性信息不同, 更低分辨率 (如 2.5°) 的奇异向量反映更大尺度的信息, 分布广泛且连续, 高分辨率 (如 0.5°) 的奇异向量反映局地化误差增长信息更为明

显, 仅分布于西北部高压脊以及南方槽处。

3.2 多尺度奇异向量初值扰动特征分析

通过 GRAPES 多尺度奇异向量初值扰动构造方法生成区域集合预报初值扰动场 (2019 年 1 月 19 日 00 时为例), 分别做了 0.5° 、 1.5° 、 2.5° 、多尺度组合奇异向量共 4 组集合预报初值扰动试验。4 组试验的第 1、8 扰动场在模式第 26 层 (约 500 hPa) 的水平分布如图 7 所示, 与单一尺度奇异向量构造的扰动场 (图 7a—c) 相比, 多尺度奇异向量扰动场 (图 7d) 融合了各个尺度扰动信息, 较为分散地分布在中国西北部、孟加拉湾以及蒙古国等不稳定区域, 既反映了大尺度扰动分布特征又突出了

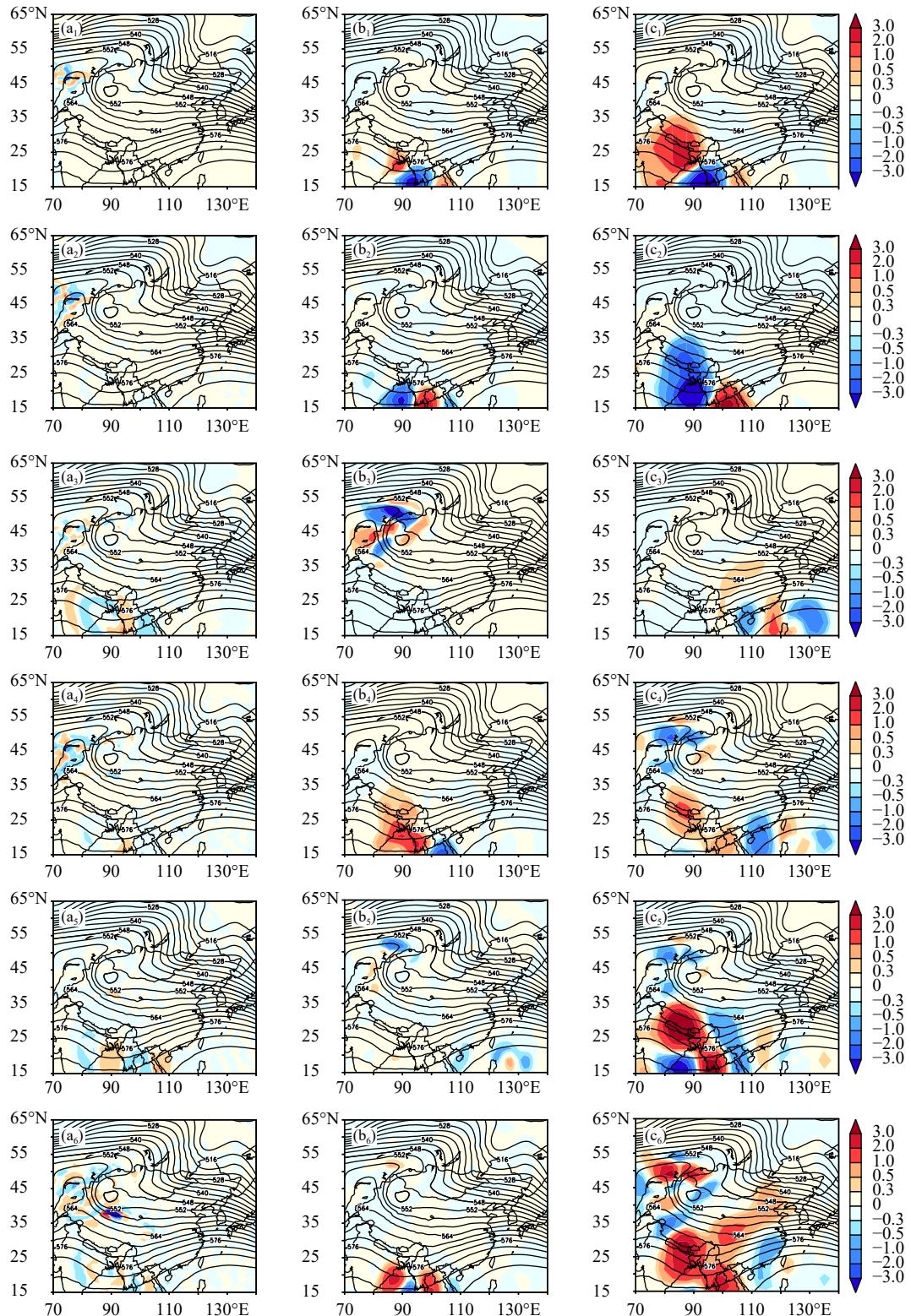


图 5 6 h 时间间隔下不同分辨率奇异向量风速 (u , 色阶, 单位: m/s) 的水平分布 (等值线: 500 hPa 位势高度; a_1-a_6 , 0.5° SV01—SV06, b_1-b_6 , 1.5° SV01—SV06, c_1-c_6 , 2.5° SV01—SV06; 均放大 1000 倍)

Fig. 5 Horizontal distributions of wind speed u (shaded, unit: m/s) of SV01—SV06 with different resolutions at 6 h interval (contours: 500 hPa potential height; a_1-a_6 , 0.5° SV01-SV06, b_1-b_6 , 1.5° SV01-SV06, c_1-c_6 , 2.5° SV01-SV06; all values are magnified by 1000 times)

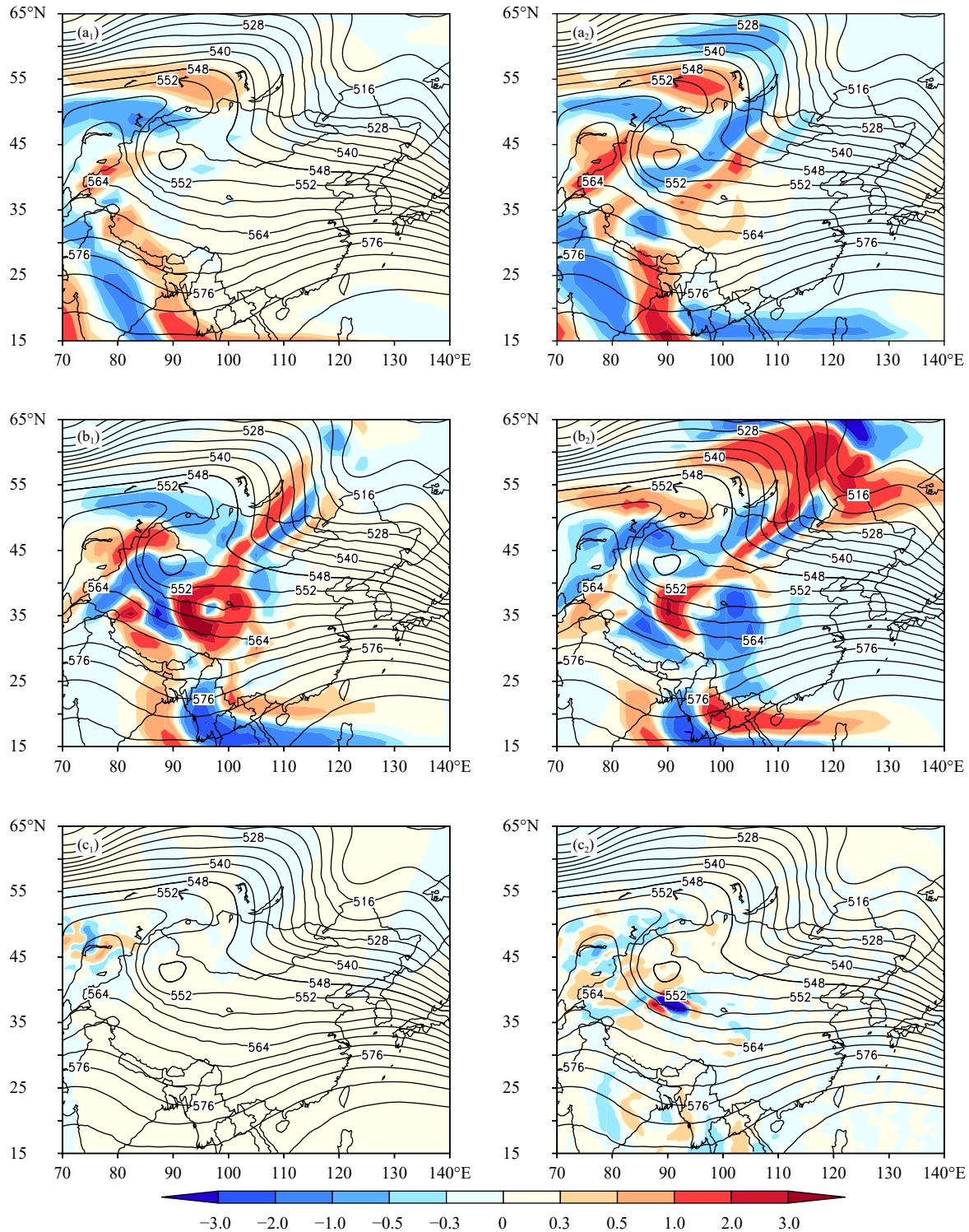


图 6 各最优时间间隔下不同分辨率奇异向量的纬向风速 (u , 色阶, 单位, m/s) 的水平分布 (等值线: 500 hPa 位势高度; a₁. 2.5° SV01, 最优时间间隔 48 h, a₂. 2.5° SV06, 最优时间间隔 48 h, b₁. 1.5° SV01, 最优时间间隔 24 h, b₂. 1.5° SV06, 最优时间间隔 24 h, c₁. 0.5° SV01, 最优时间间隔 6 h, c₂. 0.5° SV06, 最优时间间隔 6 h; 均放大 1000 倍)

Fig. 6 Horizontal distributions of zonal wind (u , shaded, unit: m/s) of singular vectors with different resolutions at various optimal time intervals (Contour: 500 hPa potential height; a₁. 2.5° SV01, optimal time interval 48 h, a₂. 2.5° SV06, optimal time interval 48 h, b₁. 1.5° SV01, optimal time interval 24 h, b₂. 1.5° SV06, optimal time interval 24 h, c₁. 0.5° SV01, optimal time interval 6 h, c₂. 0.5° SV06, optimal time interval 6 h; all values are magnified by 1000 times)

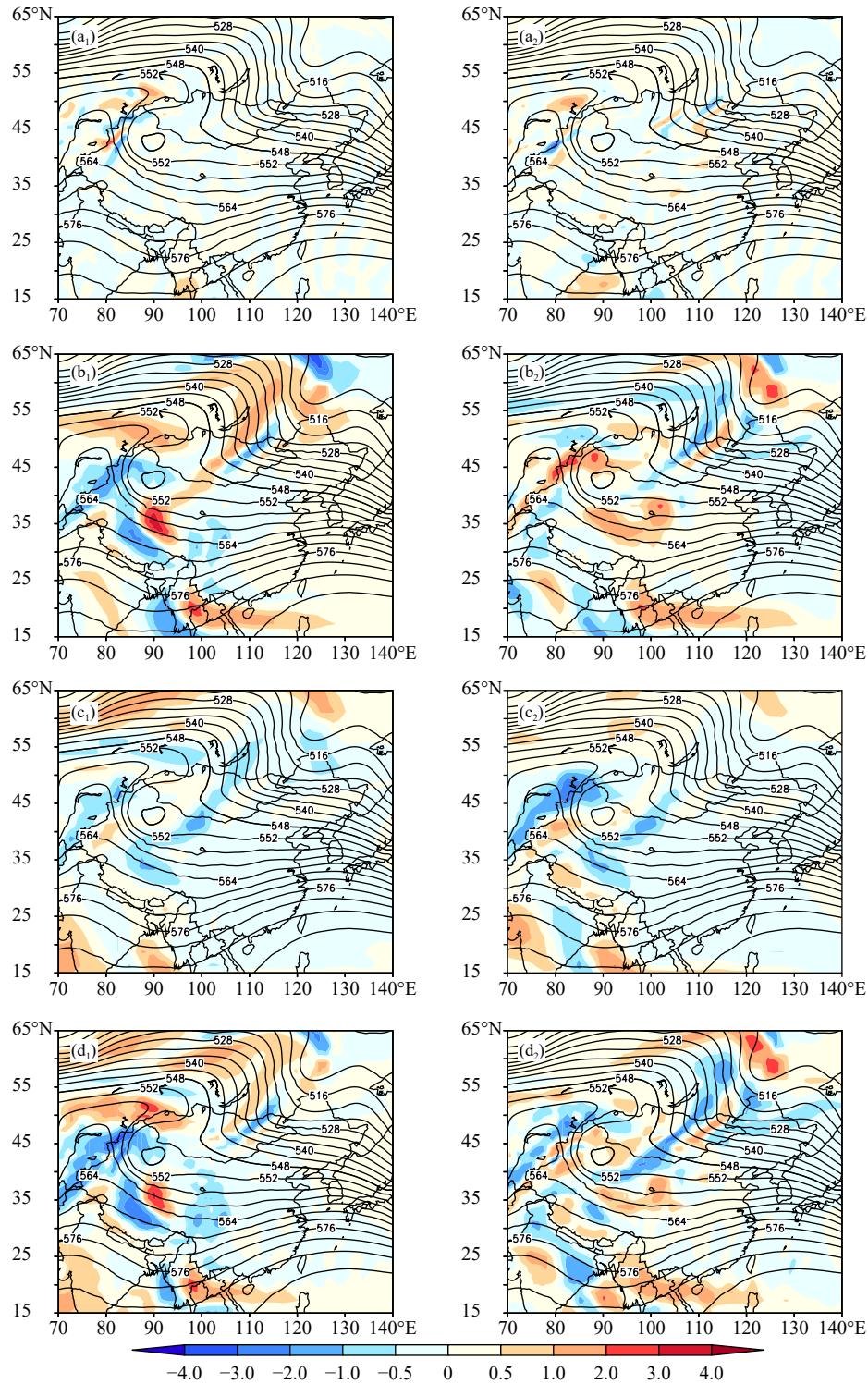


图 7 4 组试验构造的纬向风速 (u , 色阶, 单位: m/s) 扰动在第 26 层的水平分布 (等值线: 500 hPa 位势高度; a_1 . 0.5° 奇异向量扰动 1, a_2 . 0.5° 奇异向量扰动 8, b_1 . 1.5° 奇异向量扰动 1, b_2 . 1.5° 奇异向量扰动 8, c_1 . 2.5° 奇异向量扰动 1, c_2 . 2.5° 奇异向量扰动 8, d_1 . 多尺度奇异向量扰动 1, d_2 . 多尺度奇异向量扰动 8)

Fig. 7 Horizontal distributions of zonal wind u (shaded, unit: m/s) perturbations in four initial perturbation experiments on the 26th layer of the model (contours: 500 hPa potential height; a_1 . 0.5° SV perturbation 1, a_2 . 0.5° SV perturbation 8, b_1 . 1.5° SV perturbation 1, b_2 . 1.5° SV perturbation 8, c_1 . 2.5° SV perturbation 1, c_2 . 2.5° SV perturbation 8, d_1 . multi-scale SV perturbation 1, d_2 . multi-scale SV perturbation 8)

局地化信息,较为全面地代表了初值扰动的不确定性。

进一步将多尺度奇异向量扰动1、8沿不稳定区域 45°N 进行纬向垂直剖面,分析其垂直分布特征。由图8可知扰动极值位于模式第15—35层(对流层),且两个极值中心分别位于中国西北部以及蒙古国地区。高层扰动的位相落后于低层,扰动的振幅随高度升高且向西倾斜,反映了对流层的斜压不稳定特征,说明所构造的扰动场垂直方向空间分布合理。

对8 d连续试验初始时刻模式第26层(约

500 hPa)的3个不同尺度奇异向量扰动以及多尺度奇异向量扰动进行能量谱分解,得到1—339个波的扰动动能、内能、势能以及总能量谱,其中动能谱占总能量谱的绝大部分,所以以 8 d 平均动能谱为例进行分析(其中图9a中的 0.5° 扰动能谱放大了10倍)。由图9a扰动能谱的分布可知,分辨率越低,能谱的数值越大,反之亦然;且不同尺度奇异向量构造的扰动波谱能量-波长曲线各不相同,其中中小尺度动能谱-波长的分布如图9b所示, 0.5°SV 扰动在中小尺度(波长小于500 km)有较大的能量,

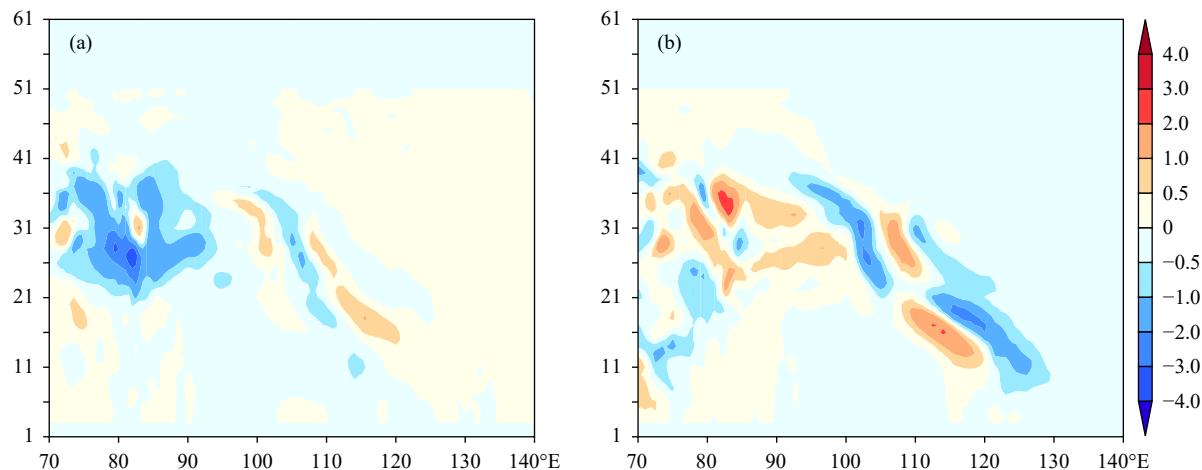


图8 多尺度奇异向量纬向风速(u)扰动沿 45°N 的垂直剖面 (a. 扰动1, b. 扰动8; 色阶, 单位: m/s)

Fig. 8 Vertical cross sections of u perturbation of multi-scale singular vectors along 45°N
(a. perturbation 1, b. perturbation 8; shaded, unit: m/s)

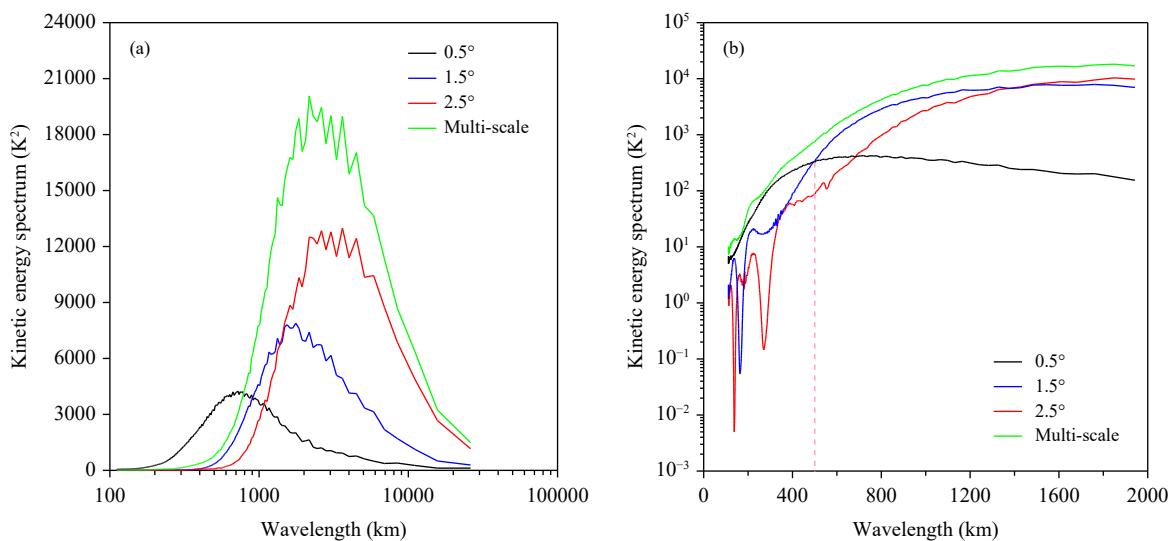


图9 4组试验在模式第26层扰动能谱与波长的关系 (a. 0.5° 扰动能谱放大10倍, b. 中小尺度部分动能谱)

Fig. 9 Relationships between kinetic energy spectrum and wavelength in four initial perturbation experiments on the 26th layer of the model (a. 0.5° perturbation spectrum is magnified 10 times, b. small and medium-scale partial kinetic energy spectrum)

1.5°奇异向量扰动则在中尺度(波长500—2000 km)保有较大的能量, 2.5°奇异向量扰动的能量主要分布于天气尺度和大尺度(波长大于2000 km);与单一尺度奇异向量扰动动能谱相比, 多尺度奇异向量混合的扰动在各个尺度均有更多的能量, 极值出现在中尺度波长约2000 km处。因此多尺度奇异向量生成的初值扰动较为全面地包含了初始场的扰动能量。

图10是2019年1月19日00时不同尺度奇异向量构造的扰动动能谱在500 hPa上随积分时间的变

化。可以看出, 各个试验的小尺度能量在积分12 h基本饱和(图10a中红色箭头所示), 此后能量增长较慢;而大尺度能量持续增长到36 h左右才趋于饱和, 说明扰动的能量随着积分时间的延长有从小尺度向大尺度传播的趋势, 这与刘畅等(2018)得出的结论相似。此外, 小尺度(0.5°)扰动在积分前12 h对应的大尺度扰动能量较小, 但增长很快, 而1.5°、2.5°及多尺度奇异向量扰动对应的大尺度动能谱在前12 h增长较慢, 主要在12—36 h增长最快, 且在积分约12 h后, 4组方案的扰动在所有尺

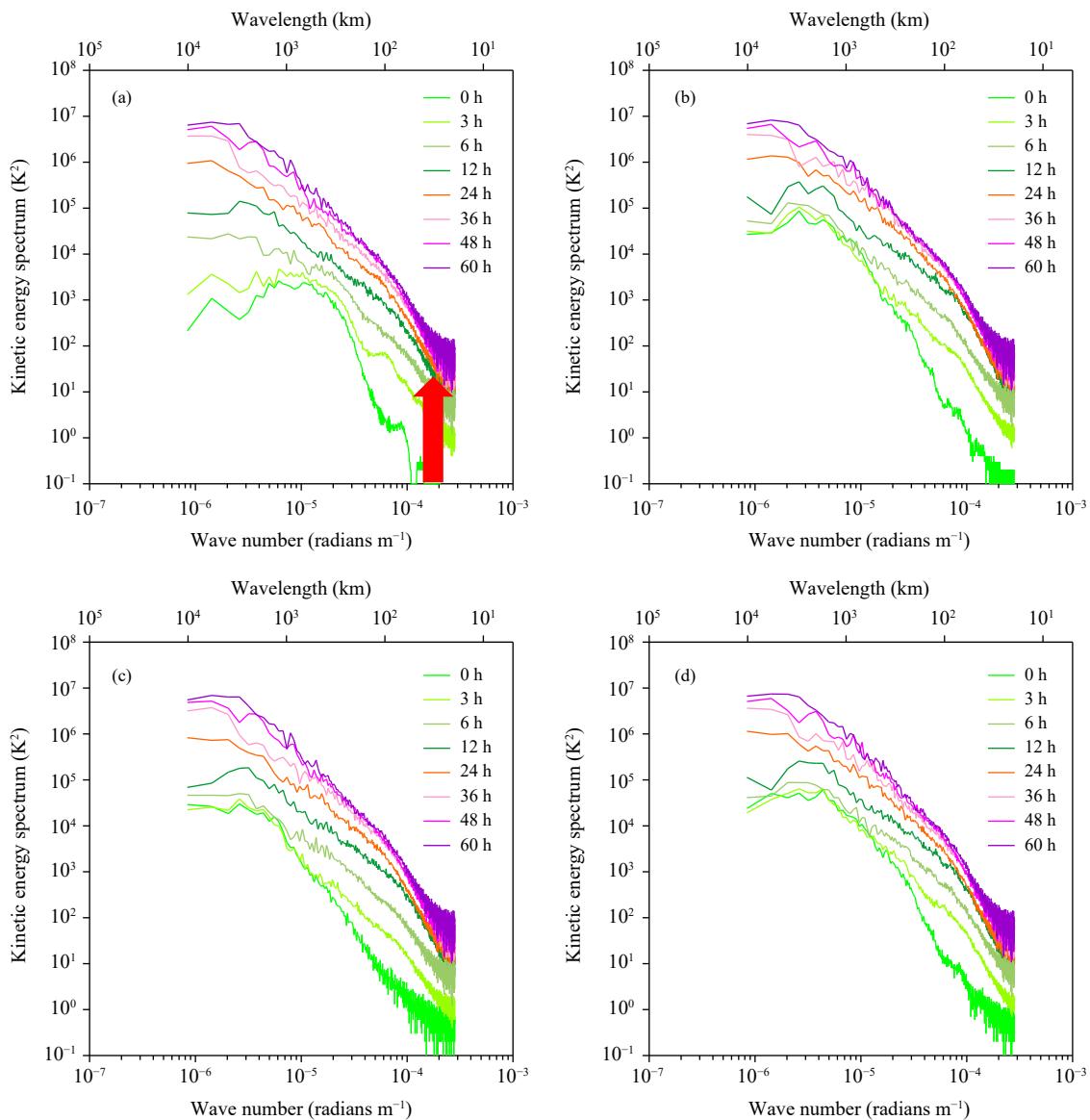


图10 4组试验不同积分时间500 hPa扰动动能的波谱分析(a. 0.5°, b. 1.5°, c. 2.5°, d. 多尺度)

Fig. 10 Analysis of kinetic energy spectra from four initial perturbation experiments at 500 hPa

(a. 0.5°, b. 1.5°, c. 2.5°, d. multi-scale)

度上表现为类似的预报扰动能谱,与 Johnson 等(2014)的结论类似。

3.3 集合预报个例试验检验

4组初值扰动法集合预报试验对250 hPa位势高度(H)、500 hPa纬向风速(U)、温度(T)、850 hPa温度(T)的60 h预报检验结果如图11所示。奇异向量初值扰动方案集合预报试验的集合一致性随预报时效的变化,一致性越接近1,预报效果越好。对比各单一尺度扰动法,1.5°奇异向量扰动的预报效果优于0.5°和2.5°,这是由于1.5°扰动尺度适中,既包含了部分大尺度的不确定信息,也在一定程度上突出了中、小尺度的局地不确定信息,因此在单一尺度中表现更优。而多尺度初值扰动法的一致性在各个预报时效均大于单一尺度奇异向量扰动法,且在积分时间前36 h优势更为显著,表明多尺度奇异向量初值扰动法较单一尺度奇异向量有更高的集合一致性,能有效减少预报误差,

从而提高预报效果。

连续等级概率评分大小反映预测能力的强弱,CRPS值越小,则预报准确率越高。图12给出的是不同尺度奇异向量初值扰动方案的CRPS评分,可以看出,多尺度奇异向量扰动法各个变量的CRPS评分在各个预报时效大都小于单一尺度,说明多尺度奇异向量能提供更为准确的概率预报技巧。

离群率评分代表了集合预报系统的漏报概率,其值越小集合预报系统越可靠,概率预报越准确。由图13可知,各单一尺度奇异向量不同垂直层次所有变量中,1.5°奇异向量有更准确的预报效果,且多尺度奇异向量的离群值大都低于各单一尺度奇异向量,说明多尺度奇异向量方法能有效降低预报系统的漏报率。通过以上检验分析可知,多尺度奇异向量初值扰动法在各个变量不同高度统计检验上基本优于单一尺度奇异向量方法,且在预报时效的前36 h效果更为显著。其他高度变量的检验也

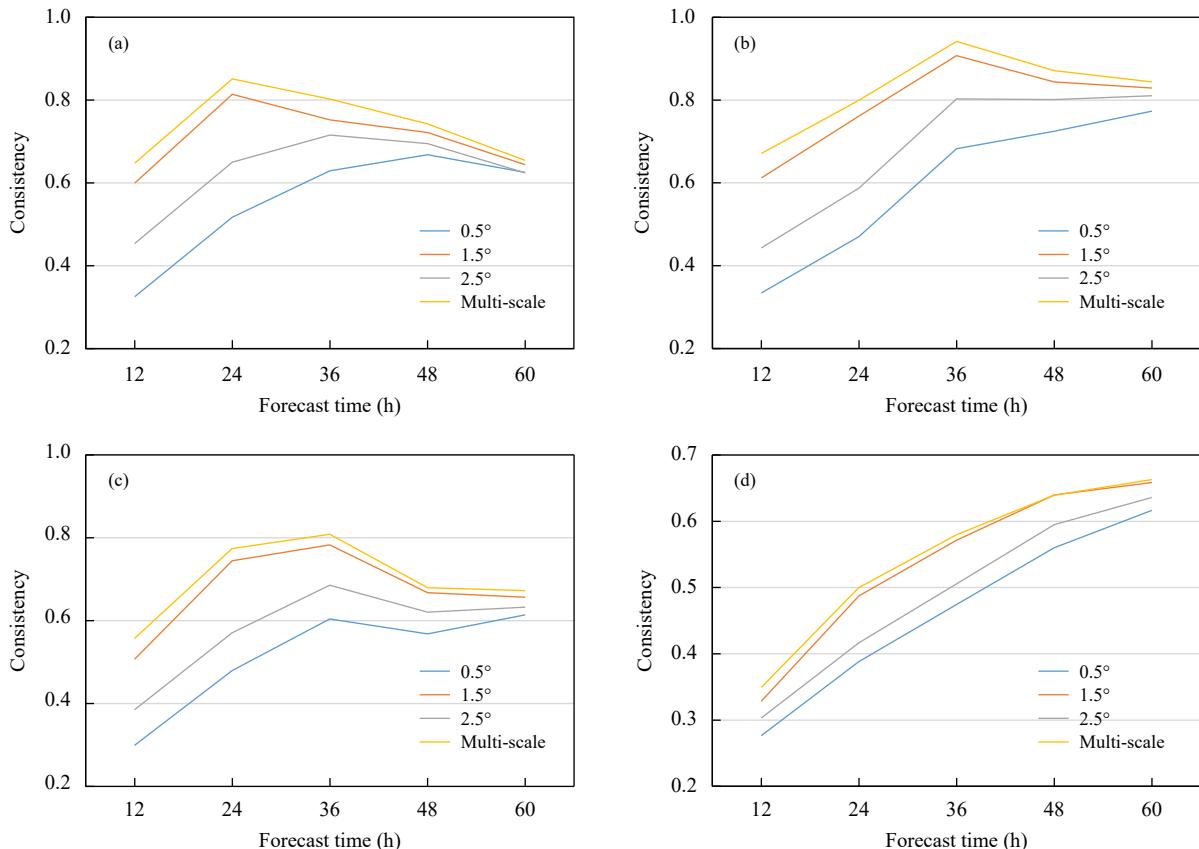


图11 4组初值扰动试验的集合一致性评分随预报时效的演变

(a. 250 hPa位势高度, b. 500 hPa纬向风, c. 500 hPa温度, d. 850 hPa温度)

Fig. 11 Variations of consistency scores with forecast time for four initial perturbation experiments

(a. geopotential potential height at 250 hPa, b. zonal wind at 500 hPa, c. temperature at 500 hPa, d. temperature at 850 hPa)

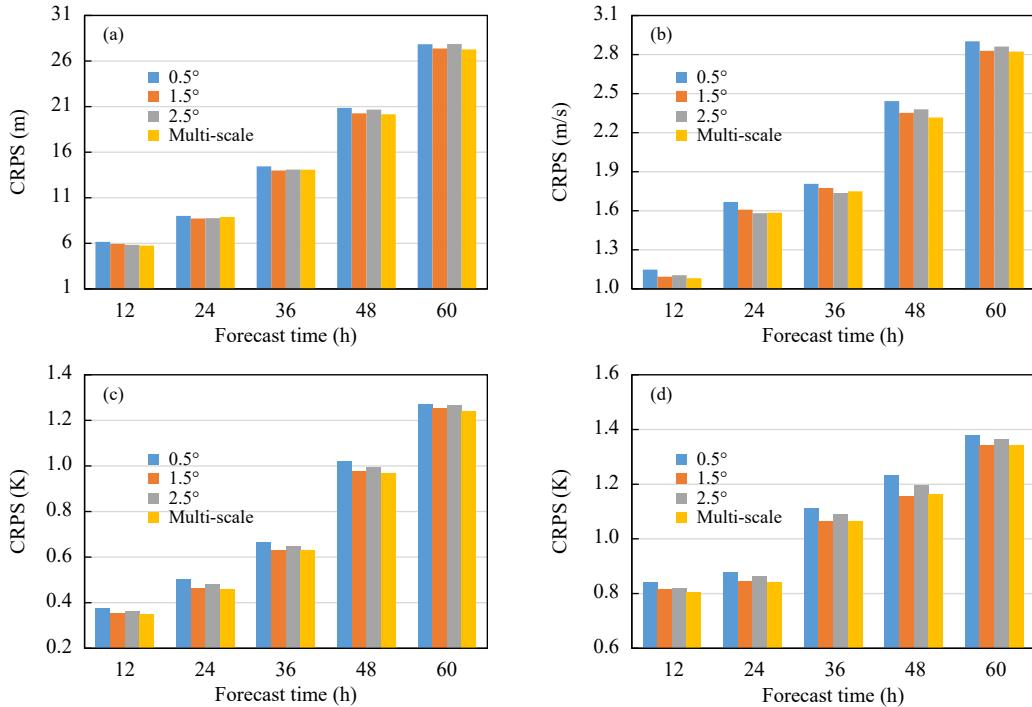


图 12 4 组初值扰动试验的 CRPS 评分随预报时效的演变

(a. 250 hPa 位势高度, b. 500 hPa 纬向风, c. 500 hPa 温度, d. 850 hPa 温度)

Fig. 12 Variations of CRPS scores with forecast time for four initial perturbation experiments

(a. geopotential potential height at 250 hPa, b. zonal wind at 500 hPa, c. temperature at 500 hPa, d. temperature at 850 hPa)

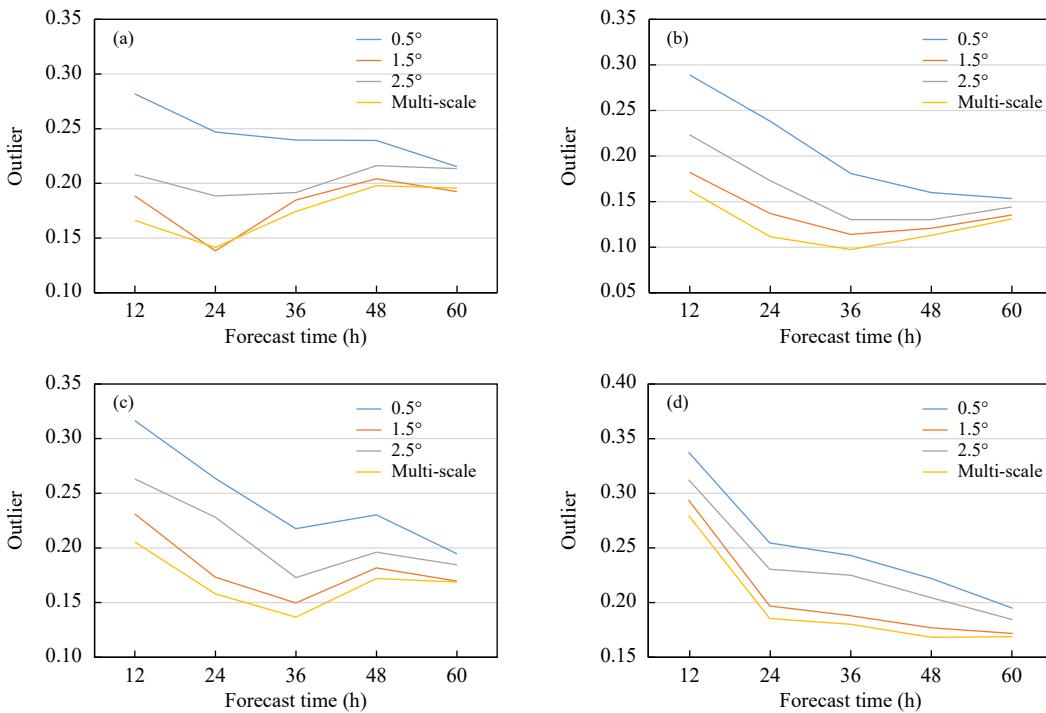


图 13 4 组初值扰动试验的离群值评分随预报时效的演变

(a. 250 hPa 位势高度, b. 500 hPa 纬向风, c. 500 hPa 温度, d. 850 hPa 温度)

Fig. 13 Variations of outlier scores with forecast time for four initial perturbation experiments

(a. geopotential potential height at 250 hPa, b. zonal wind at 500 hPa, c. temperature at 500 hPa, d. temperature at 850 hPa)

得到相同的结论(图略)。

进一步分析对降水的预报,选取中国南方地区2019年1月19日00时—20日00时24 h累计降水,观测资料为中国国家气象信息中心的中国区域地面-卫星-雷达三源融合降水分析数据,图14为控

制预报、14个成员预报以及集合平均24 h累计降水分布,整体来看集合预报成员对于该冬季个例的降水预报偏弱,但第6个成员对于南方降水的落区和量级与实况比较吻合,表明奇异向量多尺度初值扰动法能在一定程度描述降水预报的不确定性。

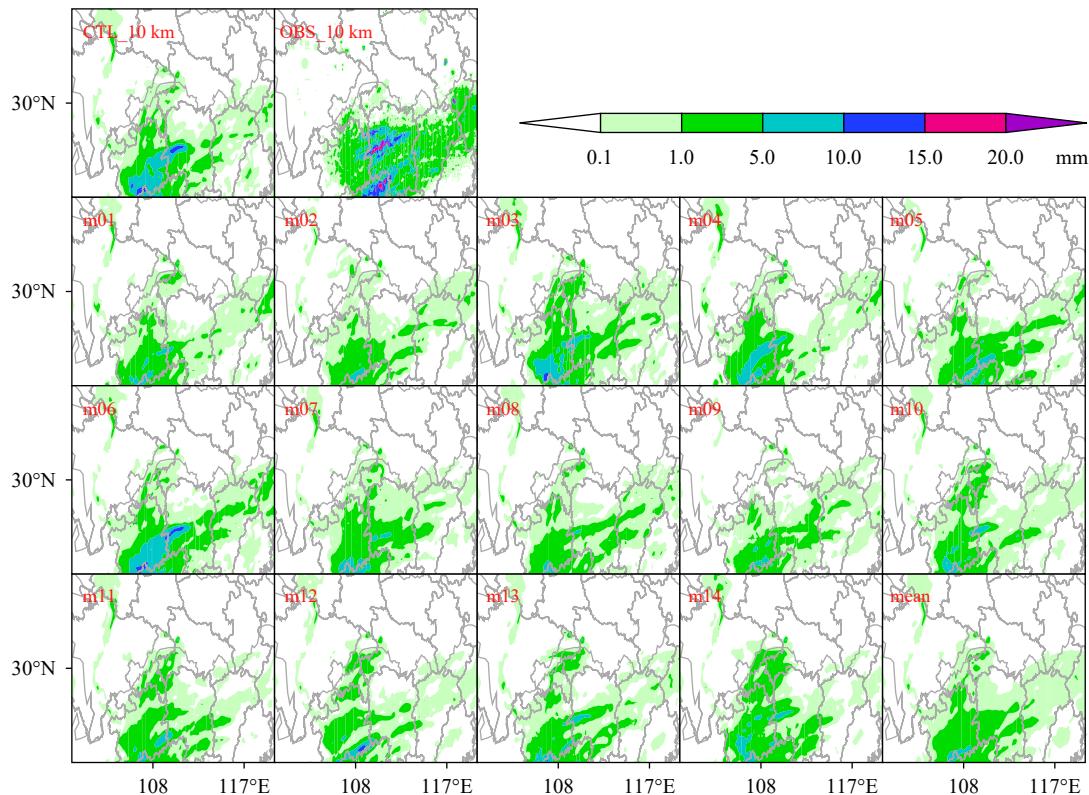


图 14 2019 年 1 月 19 日 00 时起报的 24 h 累计降水预报结果及 19—20 日的观测降水

Fig. 14 24 h cumulative precipitation forecast results initialized at 00:00 UTC 19 January 2019 and precipitation observations during 19—20 January, 2019

4 结论与讨论

基于奇异向量的物理意义以及 GRAPES 全球奇异向量计算方法,针对大气可预报性受到不同尺度初始误差相互传递作用的影响,计算生成不同空间分辨率及不同优化时间的奇异向量,以代表相空间增长最快的多尺度初值误差模态,发展基于多尺度奇异向量的扰动初值构造方法,并将多尺度初值扰动引入 GRAPES 区域集合预报中进行集合预报试验检验。得到如下结论:

(1) 多时空尺度奇异向量初值扰动法为区域集合预报提供初始扰动场是合理的,扰动在相空间中随时间增长,且在空间水平及垂直分布上较好地反

映了中纬度大气的斜压不稳定特征。

(2) 空间分辨率低(如 2.5°)的奇异向量扰动场反映的初始误差分布较广,大尺度的误差增长特征较连续丰富,空间分辨率较高(如 0.5°)的奇异向量扰动场则反映更丰富的局地小尺度的误差增长信息。多尺度奇异向量扰动可以有效地描述大尺度以及中小尺度运动的误差增长特征,与单一尺度奇异向量扰动相比,能较全面的反映出初始场的不确定信息。

(3) 预报检验结果表明,单一尺度奇异向量, 1.5° 奇异向量方法在各个层次各个变量的集合一致性、连续等级概率评分、离群值等方面大多优于其他单一尺度。

(4) GRAPES 多尺度奇异向量法的预报效果在各个方面大多优于单一尺度奇异向量法,且在预报时效前 36 h 优势更为显著,提高预报准确率,具有更高的预报技巧。

尽管研究结果对于在 GRAPES 区域集合预报模式中应用多尺度奇异向量初值扰动法提供了一定的参考和指导意义,但仍存在一些问题和挑战,如各个分辨率奇异向量构造初值扰动时,需要对尺度的权重敏感性进行更多研究和试验等。

致谢:感谢中国气象局数值预报中心专家陈德辉、胡江林、李晓莉等对于多尺度奇异向量计算方案设计及初值扰动构造的建议。

参考文献

- 陈德辉,薛纪善,杨学胜等. 2008. 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. 科学通报, (20): 6-17. Chen D H, Xue J S, Yang X S, et al. 2008. New generation of multi-scale NWP system (GRAPES): General scientific design. Chinese Sci Bull. 53(22): 3433-3445.
- 陈静,陈德辉,颜宏. 2002. 集合数值预报发展与研究进展. 应用气象学报, 13(4): 497-506. Chen J, Chen D H, Yan H. 2002. A brief review on the development of ensemble prediction system. J Appl Meteor Sci, 13(4): 497-507 (in Chinese)
- 杜钧. 2002. 集合预报的现状和前景. 应用气象学报, 13(1): 16-28. Du J. 2002. Present situation and prospects of ensemble numerical prediction. J Appl Meteor Sci, 13(1): 16-28 (in Chinese)
- 杜钧,陈静. 2010. 单一值预报向概率预报转变的基础:谈谈集合预报及其带来的变革. 气象, 36(11): 1-11. Du J, Chen J. 2010. The corner stone in facilitating the transition from deterministic to probabilistic forecasts: Ensemble forecasting and its impact on numerical weather prediction. Meteor Mon, 36(11): 1-11 (in Chinese)
- 李晓莉,刘永柱. 2019. GRAPES 全球奇异向量方法改进及试验分析. 气象学报, 77(3): 552-562. Li X L, Liu Y Z. 2019. The improvement of GRAPES global extratropical singular vectors and experimental study. Acta Meteor Sinica, 77(3): 552-562 (in Chinese)
- 李泽椿,陈德辉. 2002. 国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用. 应用气象学报, 13(1): 1-15. Li Z C, Chen D H. 2002. The Development and application of the operational ensemble prediction system at national meteorological center. J Appl Meteor Sci, 13(1): 1-15 (in Chinese)
- 刘畅,闵锦忠,冯宇轩等. 2018. 不同模式扰动方案在风暴尺度集合预报中的对比试验研究. 气象学报, 76(4): 605-619. Liu C, Min J Z, Feng Y X, et al. 2018. Comparison of different model perturbation schemes on storm-scale ensemble forecast. Acta Meteor Sinica, 76(4): 605-619 (in Chinese)
- 刘建勇,谈哲敏,顾思南. 2011. 梅雨期暴雨系统的流依赖中尺度可预报性. 大气科学, 35(5): 912-926. Liu J Y, Tan Z M, Gu S N. 2011. Flow-dependent Mesoscale predictability of Meiyu Heavy rainfall. Chinese J Atmos Sci, 35(5): 912-926 (in Chinese)
- 刘永柱,杨学胜,王洪庆. 2010. 基于切线伴随技术计算 GRAPES-Meso 模式的奇异向量. 热带气象学报, 26(4): 421-428. Liu Y Z, Yang X S, Wang H Q. 2010. Calculation of singular vectors by using the tangent and adjoint technique of GRAPES. J Trop Meteor, 26(4): 421-428 (in Chinese)
- 刘永柱,杨学胜,王洪庆. 2011. GRAPES 奇异向量研究及其在暴雨集合预报中的应用. 北京大学学报(自然科学版), 47(2): 271-277. Liu Y Z, Yang X S, Wang H Q. 2011. Research on GRAPES singular vectors and application to heavy rain ensemble prediction. Acta Sci Nat Univ Pekin, 47(2): 271-277 (in Chinese)
- 刘永柱,沈学顺,李晓莉. 2013. 基于总能量模的 GRAPES 全球模式奇异向量扰动研究. 气象学报, 71(3): 517-526. Liu Y Z, Shen X S, Li X L. 2013. Research on the singular vector perturbation of the GRAPES global model based on the total energy norm. Acta Meteor Sinica, 71(3): 517-526 (in Chinese)
- 刘永柱,张林,金之雁. 2017. GRAPES 全球切线性和伴随模式的调优. 应用气象学报, 28(1): 62-71. Liu Y Z, Zhang L, Jin Z Y. 2017. The optimization of GRAPES global tangent linear model and adjoint model. J Appl Meteor Sci, 28(1): 62-71 (in Chinese)
- 刘永柱,龚建东,张林等. 2019. 线性化物理过程对 GRAPES 4DVAR 同化的影响. 气象学报, 77(2): 196-209. Liu Y Z, Gong J D, Zhang L, et al. 2019. Influence of linearized physical processes on the GRAPES 4DVAR. Acta Meteor Sinica, 77(2): 196-209 (in Chinese)
- 马旭林,计燕霞,周勃旸等. 2018. GRAPES 区域集合预报尺度混合初始扰动构造的新方案. 大气科学学报, 41(2): 248-257. Ma X L, Ji Y X, Zhou B Y, et al. 2018. A new scheme of blending initial perturbation of the GRAPES regional ensemble prediction system. Trans Atmos Sci, 41(2): 248-257 (in Chinese)
- 施亮星,马红叶,何桢. 2015. 基于评分法的测量系统能力评价. 工业工程, (5): 1-6, 19. Shi L X, Ma H Y, He Z. 2015. A research on measurement system capability evaluation based on scoring rule. Ind Eng J, (5): 1-6, 19 (in Chinese)
- 杨学胜,陈德辉,冷亭波等. 2002. 时间滞后与奇异向量初值生成方法的比较试验. 应用气象学报, 13(1): 62-66. Yang X S, Chen D H, Leng T B, et al. 2002. The comparison experiments of SV and LAF initial perturbation techniques used at the NMC ensemble prediction system. J Appl Meteor Sci, 13(1): 62-66 (in Chinese)
- 张涵斌,智协飞,陈静等. 2017. 区域集合预报扰动方法研究进展综述. 大气科学学报, 40(2): 145-157. Zhang H B, Zhi X F, Chen J, et al. 2017. Achievement of perturbation methods for regional ensemble forecast. Trans Atmos Sci, 40(2): 145-157 (in Chinese)
- 钟科,王业桂,马环宇等. 2008. 基于奇异矢量的优化短期集合预报. 气象学报, 66(4): 537-546. Zhong K, Wang Y G, Ma H Y, et al. 2008. The optimized short range ensemble forecast based on singular vector. Acta Meteor Sinica, 66(4): 537-546 (in Chinese)

- 周秀骥. 2005. 大气随机动力学与可预报性. 气象学报, 63(5): 806-811.
- Zhou X J. 2005. Atmospheric stochastic dynamics and predictability. *Acta Meteor Sinica*, 63(5): 806-811 (in Chinese)
- Barkmeijer J, Bouttier F, Van Gijzen M. 1998. Singular vectors and estimates of the analysis-error covariance metric. *Quart J Roy Meteor Soc*, 124 (549): 1695-1713
- Barkmeijer J, Buizza R, Palmer T N, et al. 2001. Tropical singular vectors computed with linearized diabatic physics. *Quart J Roy Meteor Soc*, 127 (572): 685-708
- Buizza R, Palmer T N. 1995. The singular-vector structure of the atmospheric global circulation. *J Atmos Sci*, 52(9): 1434-1456
- Buizza R, Leutbecher M, Isaksen L. 2008. Potential use of an ensemble of analyses in the ECMWF ensemble prediction system. *Quart J Roy Meteor Soc*, 134(637): 2051-2066
- Buizza R, Leutbecher M, Isaksen L, et al. 2010. Combined use of EDA- and SV-based perturbations in the EPS. *ECMWF Newslett*, (123): 22-28
- Caron J F. 2013. Mismatching perturbations at the lateral boundaries in limited-area ensemble forecasting: A case study. *Mon Wea Rev*, 141(1): 356-374
- Ehrendorfer M, Tribbia J J. 1997. Optimal prediction of forecast error covariances through singular vectors. *J Atmos Sci*, 54(2): 286-313
- Epstein E S. 1969. Stochastic dynamic prediction. *Tellus*, 21(6): 739-759
- Errico R M, Vukicevic T. 1992. Sensitivity analysis using an adjoint of the PSU-NCAR mesoscale model. *Mon Wea Rev*, 120(8): 1644-1660
- Errico R M. 1997. What is an adjoint model?. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(11): 2577-2592
- Hersbach H. 2000. Decomposition of the continuous ranked probability score for ensemble prediction systems. *Wea Forecasting*, 15(5): 559-570
- Johnson A, Wang X G, Xue M, et al. 2014. Multiscale characteristics and evolution of perturbations for warm season convection-allowing precipitation forecasts: Dependence on background flow and method of perturbation. *Mon Wea Rev*, 142(3): 1053-1073
- Johnson A, Wang X G. 2016. A study of Multiscale initial condition perturbation methods for convection-permitting ensemble forecasts. *Mon Wea Rev*, 144(7): 2579-2604
- Kim H M, Jung B J. 2009. Singular vector structure and evolution of a recurving tropical cyclone. *Mon Wea Rev*, 137(2): 505-524
- Lang S, Jones S, Leutbecher M. 2010. The structure and sensitivity of singular vectors associated with extratropical transition of tropical cyclones. *J Org Chem*, 40(1): 3791-3793
- Langland R H, Shapiro M A, Gelaro R. 2002. Initial condition sensitivity and error growth in forecasts of the 25 January 2000 east coast snowstorm. *Mon Wea Rev*, 130(4): 957-974
- Leith C E. 1974. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. *Mon Wea Rev*, 102(6): 409-418
- Lorenz E N. 1963. Deterministic nonperiodic flow. *J Atmos Sci*, 20(2): 130-141
- Lorenz E N. 1965. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, 17(3): 321-333
- Magnusson L, Leutbecher M, Källén E. 2008. Comparison between singular vectors and breeding vectors as initial perturbations for the ECMWF ensemble prediction system. *Mon Wea Rev*, 136(11): 4092-4104
- Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. 1996. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 122(529): 73-119
- Palmer T N, Gelaro R, Barkmeijer J, et al. 1998. Singular vectors, metrics, and adaptive observations. *J Atmos Sci*, 55(4): 633-653
- Peng M S, Reynolds C A. 2005. Double trouble for typhoon forecasters. *Geophys Res Lett*, 32(2): L02810
- Rabier F, Klinker E, Courtier P, et al. 1996. Sensitivity of forecast errors to initial conditions. *Quart J Roy Meteor Soc*, 122(529): 121-150
- Reynolds C A, Gelaro R, Doyle J D. 2001. Relationship between singular vectors and transient features in the background flow. *Quart J Roy Meteor Soc*, 127(575): 1731-1760
- Staniforth A, Côté J. 1991. Semi-Lagrangian integration schemes for atmospheric models: A review. *Mon Wea Rev*, 119(9): 2206-2223
- Tan Z M, Zhang F Q, Rotunno R, et al. 2004. Mesoscale predictability of moist baroclinic waves: Experiments with parameterized convection. *J Atmos Sci*, 61(14): 1794-1804
- Tribbia J J, Baumhefner D P. 2004. Scale interactions and atmospheric predictability: An updated perspective. *Mon Wea Rev*, 132(3): 703-713
- Wang Y, Bellus M, Wittmann C, et al. 2011. The Central European limited-area ensemble forecasting system: ALADIN-LAEF. *Quart J Roy Meteor Soc*, 137(655): 483-502
- Wang Y, Tasca S, Weidle F, et al. 2012. Evaluation of the added value of regional ensemble forecasts on global ensemble forecasts. *Wea Forecasting*, 27(4): 972-987
- Wang Y, Bellus M, Geleyn J F, et al. 2014. A new method for generating initial condition perturbations in a regional ensemble prediction system: Blending. *Mon Wea Rev*, 142(5): 2043-2059
- Zhang F, Snyder C, Rotunno R. 2002. Mesoscale predictability of the "surprise" snowstorm of 24-25 January 2000. *Mon Wea Rev*, 130(6): 1617-1632
- Zhang F, Snyder C, Rotunno R. 2003. Effects of moist convection on mesoscale predictability. *J Atmos Sci*, 60(9): 1173-1185
- Zhang F, Odins A M, Nielsen-Gammon J W. 2006. Mesoscale predictability of an extreme warm-season precipitation event. *Wea Forecasting*, 21(2): 149-166
- Zhang H B, Chen J, Zhi X F, et al. 2015. Study on multi-scale blending initial condition perturbations for a regional ensemble prediction system. *Adv Atmos Sci*, 32(8): 1143-1155
- Zhang X B. 2019. Multiscale characteristics of different-source perturbations and their interactions for convection-permitting ensemble forecasting during SCMREX. *Mon Wea Rev*, 147(1): 291-310