

王淑莉, 徐祥德, 康红文, 等. 2016. 应用谱逼近方法模拟 2008 年初南方持续性降水过程及其水汽通道周期特征分析 [J]. 大气科学, 40 (3): 476-488.  
Wang Shuli, Xu Xiangde, Kang Hongwen, et al. 2016. The simulation of continuous rainfall over South China in early 2008 with the spectral nudging method and the periodicity characteristics of the water vapor channel [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (3): 476-488, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1507.14332.

# 应用谱逼近方法模拟 2008 年初南方持续性降水过程及其水汽通道周期特征分析

王淑莉<sup>1</sup> 徐祥德<sup>1</sup> 康红文<sup>1</sup> 张胜军<sup>1</sup> 张夕迪<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

<sup>2</sup> 国家气象中心, 北京 100081

**摘 要** 本文利用谱逼近方法, 对 2008 年初发生在我国南方的大范围持续性降水过程进行了对比试验, 结果发现使用谱逼近方法的试验模拟所得的雨带空间分布和降水强度明显优于没有使用谱逼近方法的试验。对于低层受槽线、风切变线等频繁影响的区域, 使用谱逼近方法的试验得到的经向风场具有 2~4 天的显著周期特征, 与实况较为一致, 即该方法能够提高模式对经向风场的模拟能力。综合分析水汽输送通道、模拟区域位置以及水汽通道超前高相关区的周期特征可知: 谱逼近方法可能把中南半岛东部区域这一超前高相关区的经向水汽输送信息引入模式, 从而改善了模式对降水区水汽收支周期的模拟能力, 这可能是该方法能够改善降水模拟的重要原因之一。另外, 对于谱逼近方法没有直接作用的模式变量, 经过模式内部各变量之间的相互调整, 其在谱逼近试验中的统计结果也有不同程度的提高。本文研究结果表明, 谱逼近试验通过引入外源性的周期特征因素项, 调整了模式与大尺度驱动场之间的协调关系, 进而能够提高两周内模式模拟水平。此方法可能会在模式数值预报中具有一定的实际使用价值。

**关键词** 降水模拟 谱逼近 水汽输送

文章编号 1006-9895(2016)03-0476-13

中图分类号 P456

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1507.14332

## Simulation of Continuous Rainfall over South China in Early 2008 with the Spectral Nudging Method and the Periodicity Characteristics of the Water Vapor Channel

WANG Shuli<sup>1</sup>, XU Xiangde<sup>1</sup>, KANG Hongwen<sup>1</sup>, ZHANG Shengjun<sup>1</sup>, and ZHANG Xidi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

<sup>2</sup> National Meteorological Center, Beijing 100081

**Abstract** The spectral nudging (SP) method is used in simulating continuous precipitation processes that occurred over South China in early 2008. The results show that the spatial distribution and intensity of precipitation in the SP experiment is obviously better than that without use of this method (NOSP). For the area affected frequently by troughs or

收稿日期 2014-12-03; 网络预出版日期 2015-08-06

作者简介 王淑莉, 女, 1989 年出生, 硕士研究生, 主要从事数值模拟及预报方向研究。E-mail: shuliwang2013@126.com

通讯作者 徐祥德, E-mail: xuxd@cma.gov.cn

资助项目 国家科技支撑计划项目 2012BAK10B04, 国家自然科学基金项目 41130960

**Funded by** National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant 2012BAK10B04) National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant 41130960)

wind shear lines in lower layers, a 2–4-day oscillation period of meridional wind is found in the SP experiment, which is consistent with observations. This means that the SP method may enhance the simulation ability of the meridional wind field. Based on a comprehensive analysis of the water vapor transport pathway, the model domains and periodicity features of high-correlation regions in advance of the water vapor channel, we find that the SP method can introduce meridional vapor transport information over the eastern Indo-China Peninsula into the model, improving the simulation ability of the cycle of the water vapor budget in the precipitation area. This could be an important reason why the SP method improves the rainfall simulation in the SP experiment. Furthermore, the variables indirectly affected by the SP method are statistically improved by means of the interaction with other variables in the SP experiment. Above all, the exogenous cycle characteristic factors introduced by the SP method, which adjust the coordination between modeling and large-scale forcing fields, could improve simulation results within a forecast time of two weeks. This method has the potential to be of practical value in numerical prediction.

**Keywords** Rainfall simulation, Spectral nudging, Water vapor transmission

## 1 引言

随着大型计算机的发展、模式自身的完善以及卫星、雷达等非常规资料的应用,数值天气预报的准确率不断提高。目前数值模式中期可用形势预报可达 9~10 天左右,两周内模式预报包含时间段 10~14 天,属于延伸期预报的范畴。而延伸期预报被认为是数值预报的一个缝隙,在此时间段内,初值信息微弱、初始条件的不确定性使得初始误差随时间增长,积分到 3~5 天后误差倍增;此时外源强迫作用开始显现,它既是初值问题也是边值问题,这在理论上决定了做延伸期的预报相当困难 (Peng et al., 2013)。同时,持续性天气异常可以引发多种严重的气象灾害,如夏季持续性暴雨引发的洪涝、持续性的高温热浪、冬季雨雪冰冻灾害、春秋季节低温连阴雨以及持续干旱少雨天气等,对人民的生命财产安全以及社会经济的健康发展构成了严重的威胁。因此如何改进两周内数值天气预报,并且使之具有实际使用价值值得深入研究。

Peng et al. (2013) 提出利用异常整合和历史气候资料的方法改进 15 天内数值天气预报,把预报对象分解为气候平均值及其距平值两部分,即把气候值的演变看作已知,模式预报的是距平值,这个方法是对数值模式预报结果进行调整,形成最终预报。丑纪范等 (2010) 以数值模式为基础,提出一种 10~30 天延伸期数值天气预报的设想,认为 10~30 天的预报虽然超出了逐日天气的可预报时限,但仍存在可预报分量,针对可预报分量和混沌分量应采用不同的策略和方法。郑志海 (2010) 以国家气候中心业务月动力延伸预报系统为基础,从可预报性理论出发,提出分离可预报分量和混沌分量的方法以及可预报分量和混沌分量的集合预报方法,最终

建立了一个可以实时运行的中期延伸期预报系统。王启光 (2012) 从数值模式预报变量误差增长的角度出发,发展了在实际大气模式中提取可预报分量的方法,初步建立了针对 10~30 天延伸期预报的预报模式。

在数值天气预报模式积分过程中,误差来源主要有初始误差和模式误差两个方面。为了减少数值预报的初始误差,大量高精度、高时空分辨率的观测资料以及各种资料同化技术都被用来改善模式初值,这些工作无疑能给初值条件带来优化。但是由于观测误差、资料密度以及对观测资料的客观分析过程中不可避免地存在误差,再精细的初值场也只是大气真实状态的一种近似 (车玉章, 2014)。在区域动力模式预报中,模式受大尺度偏差的影响较为严重,区域模式又使得大尺度偏差继续扩大,这极大地制约着区域动力模式的预报时效。Davies (1976) 提出了设立缓冲区的侧边界方案去协调区域模式与大尺度强迫场之间的差异。这一方案自提出后就广泛应用于区域模式中,包括现在应用广泛的 Weather Research and Forecasting Model (WRF)。然而这一方案没有考虑到大尺度偏差在区域内也是会有发展的,因为区域模式不具备识别大尺度波的能力,因此不具备在有限区域内合理改变大尺度波主要性状的能力。

由于两周的数值预报积分时间长,初值信息在后期积分过程中信号越来越弱,外源强迫作用越来越强,因此单纯使用缓冲区的侧边界方案去协调区域模式与大尺度强迫场之间的差异,仅从模拟区域边界上添加强迫已远远不够。

为引入外源强迫信息,在 WRF 模式中有分析逼近法 (Analysis Nudging)、观测逼近法 (Observation Nudging) 以及谱逼近方法 (Spectral Nudging)。其

中,分析逼近方法是把驱动场格点值插值到以模式当前时间步长为基础的、趋向网格分析法,观测逼近法是将时空分布不均匀的站点观测值同化到模式中 (Stauffer and Seaman, 1990, 1994; Stauffer et al., 1991; Seaman et al., 1995)。这两种方法对欲引入的外源强迫场的各尺度信息无区别对待,向模式添加外源性的中小尺度信息反而可能会对模式本身模拟出的中小尺度信息造成影响,不利于模拟结果;而谱逼近法是将驱动场大尺度谱信息添加到模式模拟区的较高层面上。

Waldron et al. (1996) 首先提出谱逼近的思想,利用谱滤波的方式,把大尺度信息添加到模拟区域中,而不是通过侧边界强迫。von Storch et al. (2000) 提出把谱逼近技术作为模式侧边界方案的替代方法,证明其既可使模式模拟在大尺度上接近驱动场,又不会阻止模式中小尺度特征的发展。Cha and Lee (2009) 用谱逼近方法进行长期区域气候模拟,并对 1998 年我国夏季降水进行模拟,发现谱逼近方法对降水的模拟有较好提高。Cha et al. (2011) 提出 intermittent spectral nudging 方法,认为这种方法可以减少谱逼近强迫给模式中小尺度特征的发展带来的削弱作用。宋寔和汤剑平 (2011) 利用 Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), 分析了谱逼近方案对我国区域气候模拟中区域大小和位置的敏感性影响,发现该方案能有效降低区域气候模式对大尺度环流场的模拟偏差和嵌套区域选取的敏感性。曾先锋和周天军 (2012) 在 Regional Climate Model 3.0 (RegCM3.0) 中对风场采用谱逼近方法,并以 2003 年江淮梅雨过程为例进行研究,结果表明该方法能校正模式模拟的梅雨期环流形势和梅雨锋位置偏北导致降水偏北的偏差。

从前面的介绍可以看到,谱逼近方法在模式积分过程中不仅从模拟区域边界上,同时从模拟区域内部向模式添加外源强迫项,从而控制模式的积分预报与大尺度驱动场资料保持一致,并且能够保留模式自身产生的小尺度信息 (Cha and Lee, 2009)。这在模式进行两周模拟的后期,即外源强迫作用逐渐增强的阶段可以对模式大尺度场及时进行调整,从而提高模式的模拟结果。国内目前对于谱逼近方法的研究主要应用于对区域气候的模拟,本文从天气过程模拟出发,以 2008 年 1 月 25 日至 2 月 5 日我国南方的连续降水过程为模拟样本,主要关注中小尺度系统发展和降水模拟,并对使用谱逼近方法

的 WRF 模式模拟的试验结果进行分析,主要从谱周期特征的视角分析强降水过程中的低层环流特征、整层水汽特征,并剖析暴雨过程的主要水汽通道及其路径关键区的周期特征,以揭示谱逼近方法引入的外源强迫场周期信息对于模式模拟效果的重要作用。

## 2 资料方法和试验设计

### 2.1 资料方法介绍

#### 2.1.1 谱逼近方法

谱逼近方法是把区域模拟作为一种“降尺度”问题来处理,在模式积分过程中,在大尺度谱空间向整个模拟区域添加逼近项,从而减小模式变量与驱动场之间的偏差。

使用谱逼近方法向模拟区域内某个变量的大尺度谱空间添加逼近项时,按照下面这一公式进行:

$$\alpha_R(L_G \cap L_R) = [1 - \eta(\delta)]\alpha_R^*(L_G \cap L_R) + \eta(\delta)\alpha_G(L_G \cap L_R) \quad (1)$$

其中,  $L_G$  和  $L_R$  分别代表全球和区域模式中的大尺度谱空间;  $(L_G \cap L_R)$  代表大尺度驱动场和区域模式场通过傅里叶变换进行谱分解之后,在长波谱区域的交集;  $\alpha_G$ 、 $\alpha_R$  和  $\alpha_R^*$  分别是大尺度驱动场、逼近场和区域模式模拟场中的变量。

逼近系数  $\eta$  是高度的函数,  $\eta(\delta) = 0.05(1 - \delta)^2$ , 参数  $\delta$  是垂直坐标。可以看出,在垂直向低层强迫项所占比重较小,随着高度的增加,强迫项所占比重越来越大。

截断波长的选取主要根据区域模式选取空间的大小和欲引入目标信号的波长来确定,波长低于截断波长的波被滤除,只处理波长大于或等于截断波长的波信息,再通过逼近系数的选择来控制欲引入目标信号的权重。

谱逼近方法利用再分析资料作为驱动场,在谱空间向模式区域内加入逼近项,对指定模式变量的大尺度场进行调整。添加的强迫项主要在垂直向的较高层面上,从而使模式与驱动场在较高层面的大尺度场保持一致,低层自由发展中小尺度活动。谱逼近方法的这些特点,使得区域模式在较高层面上与驱动场偏差减小的同时,能够发挥区域模式的优点,自主发展对流层低层中小尺度的物理过程。

#### 2.1.2 小波分析

针对某一待处理的信号或函数,对其进行小波

分析的基本思想是用一簇小波函数系去表示或者逼近它。小波变换将时间序列分解到时间频率域内, 得到它的周期变化动态和周期变化动态的时间格局。小波分析将信号分解成一系列小波函数的叠加, 都是由一个母小波函数经过平移与尺度伸缩得来的, 因此选择合适的母小波函数是进行小波分析的前提。一般对某一信号进行分析, 预期得到平滑且连续分布的小波振幅, 非正交小波函数能达到上述要求。使用复值小波, 能够得到时间序列振幅和相位两方面的信息, 可以对相位进行很好的表达 (Torrence and Compo, 1998)。Morlet 小波具有非正交性, 而且是由 Gaussian 调节的指数复值小波, 因此成为很好的选择。

本文选用小波系数模方图 (也称为小波功率谱图) 和小波方差图进行研究。小波系数的模方相当于小波能量谱, 它可以分析出不同周期的震荡能量; 小波方差图能反映时间序列的波动能量随尺度的分布情况。

### 2.1.3 异常相关系数和均方根误差

异常相关系数 (abnormal correlation coefficient, ACC) 可用来衡量预报值和分析值之间的相关程度, 最大为 1.0, 在预报检验中, 当异常相关系数大于 0.6 时, 通常认为预报是成功的 (Wang et al., 2008)。均方根误差 (root-mean-square error, RMSE) 又叫标准误差, 用来衡量预报值和分析值之间的偏差, 均方根误差越小表明二者越接近。ACC 与 RMSE 的表达式分别为

$$ACC = \frac{\sum_i (y_{ip} - \bar{y}_{ip})(y_{ia} - \bar{y}_{ia})}{N \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (y_{ip} - \bar{y}_{ip})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (y_{ia} - \bar{y}_{ia})^2}} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (y_{ip} - y_{ia})^2} \quad (3)$$

式中,  $y_{ip}$ 、 $y_{ia}$  为格点  $i$  上的预报值和分析值,  $\bar{y}_{ip}$ 、 $\bar{y}_{ia}$  分别表示第  $i$  个格点上的预报、分析的平均值。计算空间相关时,  $N$  为空间上总格点数, 相关系数为一个时间序列, 表示预报能力在空间上的时间变化。

### 2.1.4 资料

本文研究中使用了美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 和国家大气研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR) 的全球预报模式最终分析资料 (Final Operational Global Analysis data,

FNL) 为模式提供海温驱动、初始条件以及边界条件, 所用资料的时段为: 2008 年 1 月 21 日 00 时 (协调世界时, 下同) 至 2 月 5 日 00 时, 空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ , 时间分辨率为 6 小时; 降水资料使用 2008 年 1 月 22 日 00 时至 2 月 5 日 00 时时段内的 NCEP/NCAR 的再分析地面通量资料中的格点降水率资料, 空间格点分布为纬向  $0^\circ \sim 358.125^\circ$ , 格距  $1.875^\circ$ , 经向 94 个格点, 非等间隔分布, 时间分辨率为 6 小时; MICAPS (Meteorological Information Comprehensive Analysis and Processing System) 第三类数据格式的加密 24 小时站点降水量。

### 2.2 中尺度模式试验设计

本文模拟试验使用完全可压缩的、中尺度非静力模式 WRF3.4 (Skamarock, et al., 2008), 模式试验起报时间为 2008 年 1 月 22 日 00 时, 积分 14 天到 2008 年 2 月 5 日 00 时结束, 模式资料的输出频次为逐 6 小时输出。使用兰伯托投影, 模拟区域的中心位置定于 ( $28^\circ\text{N}$ ,  $108^\circ\text{E}$ ), 两层双向嵌套, 图 1 为模拟试验模式两层区域嵌套图, 其中黑色框代表内层区域。外层区域和内层区域的网格距分别是 24 km、8 km, 区域格点数 (东西  $\times$  南北) 分别为  $220 \times 142$ 、 $313 \times 253$ 。侧边界缓冲区包含 5 个格点, 垂直坐标采用静力气压下的地形追随坐标, 垂直向 40 个分层, 模式顶层 50 hPa。模式采用 Grell-Devenyi 积云参数化方案, 微物理过程采用 WSM6 (WRF single-moment six-class) 微物理过程方案, 行星边界层过程使用 Yonsei University 方案, 长波辐射采用 RRTM 方案, 短波辐射采用 Dudhia 方案, 陆面过程采用 5 层热量扩散方案。试验包括两个模拟方案: 无谱逼近方法的参照试验 (NOSP) 和使用谱逼近方法的试验 (SP)。其中, SP 试验对内外两个区域的纬向风、经向风进行谱逼近处理。模式推荐截断波长 1000 km 以上, 因此内外两个区域的纬向、经向截断波数分别选为 5、2 和 3、2, 即东西、南北向的截断波长都在 1000 km 以上。模式垂直空间的十层以下不进行外源强迫的处理, 从第十层 (700 hPa 附近) 开始进行谱逼近强迫项的添加, 并且随着高度的增加, 强迫项所占比重越来越大。

## 3 2008 年 1 月 25 至 2 月 5 日持续性降水过程

2008 年初中国南方出现了大范围的持续“低温雨雪冰冻”天气, 这次强天气事件过程范围广、强

度大、持续时间长且灾害极为严重,其天气学特征表现为中高纬阻塞形势稳定少变,低纬系统活跃确保水汽输送(王东海等,2008)。期间,长江中下游及贵州连续低温日数和连续冰冻日数均超过1954/1955年冬季,达到历史最大值(王凌等,2008),5次主要降水过程分别出现于1月10~15日、18~22日、25~28日、1月31日至2月2日、2月4~5日(杨贵名等,2008)。本文利用WRF模式对这次持续时间较长的降水过程,进行SP和NOSP对比试验。在雨带空间分布以及降水强度方面对比两个试验的结果,发现经过谱逼近方法处理的SP试验降水结果改善较好的天数为9天左右,分别是1月25~29日、1月31日至2月1日、2月3日和2月5日(图略)。选取这次对比试验的第5、10、14天,即1月27日、2月1日、2月5日为代表,对模式模拟降水与站点降水资料进行对比分析。

1月27日,观测到30 mm以上强降水主要分布在(24°~26°N, 110°~120°E)地区(图2a); NOSP模拟强降水(图2g)在(25°~31°N, 108°~120°E)地区,雨带范围偏大且分布散乱; SP模拟强降水(图2d)主要分布在福建中北部、广东北部及周边地区,SP模拟的雨带位置更为集中,虚报降水情况得到很好的改善。2月1日,观测到25 mm以上的降水主要分布在广东北部与湖南、江西、福建南部交界一带(图2b); NOSP中雨带位置偏北且范围较宽(图2h);而SP中的雨带位置更为集中,和观测较为接近(图2e)。2月5日,广东、福建、江西一带有15 mm以下的降水(图2c); NOSP试验降水主要发生在西南地区(图2i),比实况降水位置偏西北,而在观测到降水的东南地区没有做出正确模拟; SP试验模拟降水很好的反映了降水的真实落区(图2f)。

由上述分析可见,2008年1月25至2月5日的持续强降水过程主要集中在(22°~27°N, 108°~118°E)这一区域,因此将该强降水区域定义为A区(下同)。由于没有获得逐小时观测降水数据,本文降水功率谱及方差分析使用逐六小时的NCEP/NCAR再分析格点降水率资料。将A区逐六小时降水率资料累加成逐日降水资料,其与站点观测降水资料的相关系数为0.7798,通过99%显著性检验,说明再分析降水率资料能够代表同时段同区域的观测降水资料,可信度很高。对区域A的逐六小时再分析格点降水率资料和模拟降水进行区域

平均,形成降水的时间序列,通过小波分析进行周期分析。从结果来看(图3),再分析降水存在1天、2~4天的显著性降水周期,且以2~4天为降水变化的主周期。其中,1天左右的功率谱在整个强降水时段内分布较为均匀,而2~4天左右的周期能量谱主要集中在整个过程的后半段。SP试验和NOSP试验均在降水过程后半段存在2~4天显著周期,其中SP试验在1月28~29日存在1天的显著周期,而NOSP试验缺少1天左右的显著周期。从功率谱形态分布上来看,SP试验和再分析降水更为接近。再分析降水在方框标注区的1、2天周期有显著能量谱存在,SP试验结果较好的体现出这一信息,而NOSP试验几乎没有显著的能量谱与之对应。通过谱逼近方法引入外源强迫场的短周期信息,SP试验的模式降水谱周期向1~2天的短周期调整,从而做出较好的周期模拟。

#### 4 持续性降水过程环流及水汽通道的周期性特征

为了探究谱逼近方法的外源信息引入能力,首先从环流场的角度进行剖析。对降水过程时段内的850 hPa环流配置场(图略)进行研究,综合考虑该高度各时次槽线的影响位置、风切变以及降水区等因素,选取(25°~30°N, 110°~115°E)作为研究区域。在模拟时段内对该区域内的高度场、温度场、纬向风场和经向风场逐六小时的FNL资料、SP模拟和NOSP模拟资料,分别使用小波分析方法分析其周期信息。对比发现,SP试验对于经向风场的模拟结果(图4)明显优于其他三个要素(图略)。SP试验较好的模拟出了该层经向风存在2~4天左右的周期(图4b),而NOSP试验则未能体现出这一信息(图4c),说明使用SP方法能够较好改进影响降水区的低层环流场(尤其是经向风场)的模拟结果。

下面考虑水汽输送方面的影响。在降水过程时段内,计算过程平均的整层(地面~200 hPa)水汽通量、经向整层水汽通量 $q_v$ 与A区降水量超前24小时相关系数(图5)。结果表明,往A区输送的水汽主要是从孟加拉湾、南海经中南半岛转向以及西北太平洋海上而来。这与何溪澄等(2006)的研究结论——冬季中国南方地区的水汽主要来自南支西风带低槽前部的西南气流和南海—中南半岛上空的转向气流以及施晓晖等(2009)的研究结

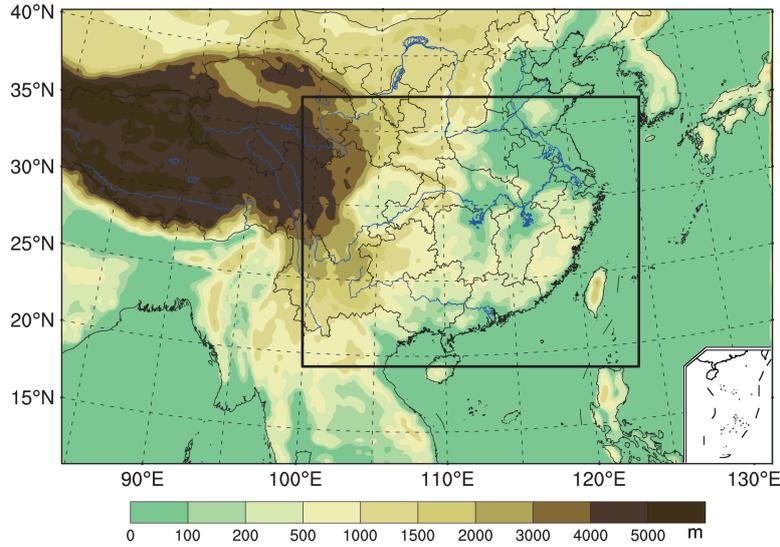


图 1 模拟试验模式两层区域嵌套图。阴影：地形高度

Fig. 1 The two domains of the model simulation. Shading: terrain height

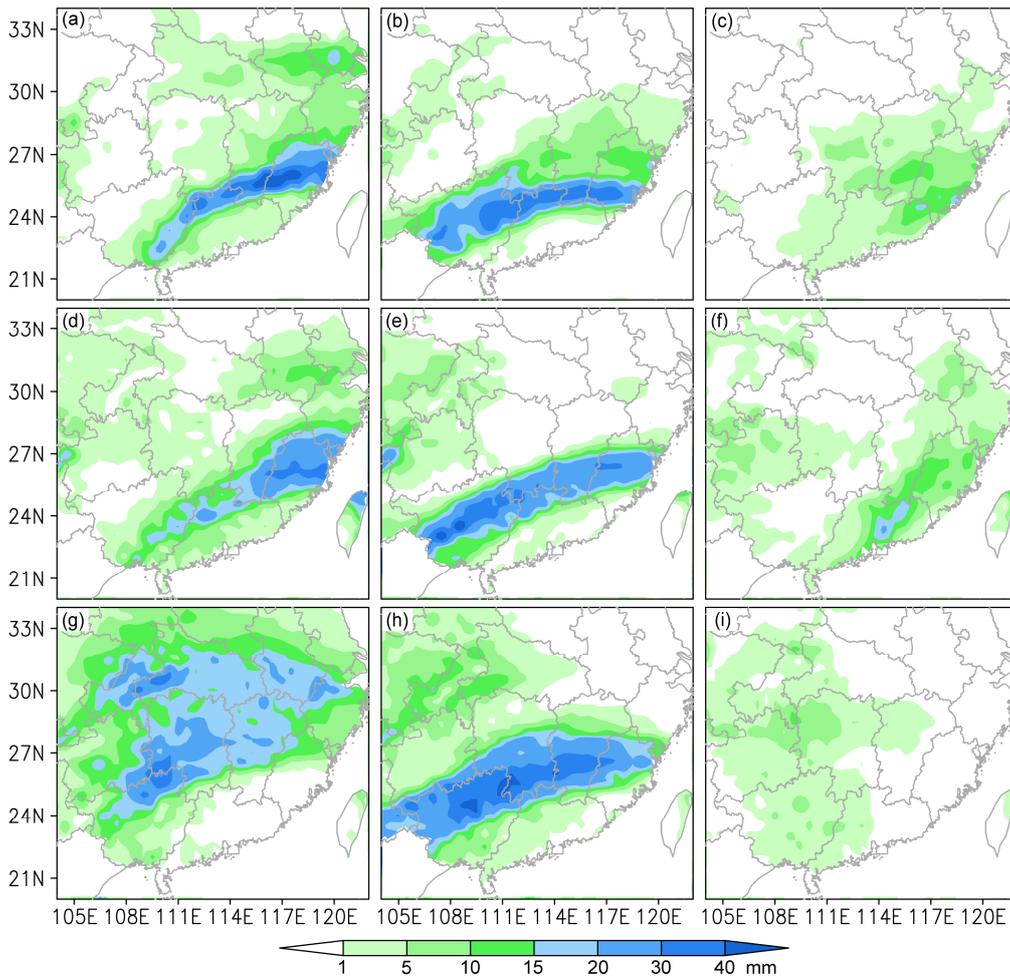


图 2 2008 年 (a、d、g) 1 月 27 日 00 时 (协调世界时, 下同)、(b、e、h) 2 月 1 日 00 时、(c、f、i) 2 月 5 日 00 时的 24 小时累积降水量: (a-c) 对应观测降水; (d-f) 对应 SP 试验模拟降水; (g-i) 对应 NOSP 试验模拟降水

Fig. 2 The 24-hour accumulative precipitation at (a, d, g) 0000 UTC 27 January, (b, e, h) 0000 UTC 1 February, and (c, f, i) 0000 UTC 5 February: (a-c) Observation; (d-f) expt SP; (g-i) expt NOSP

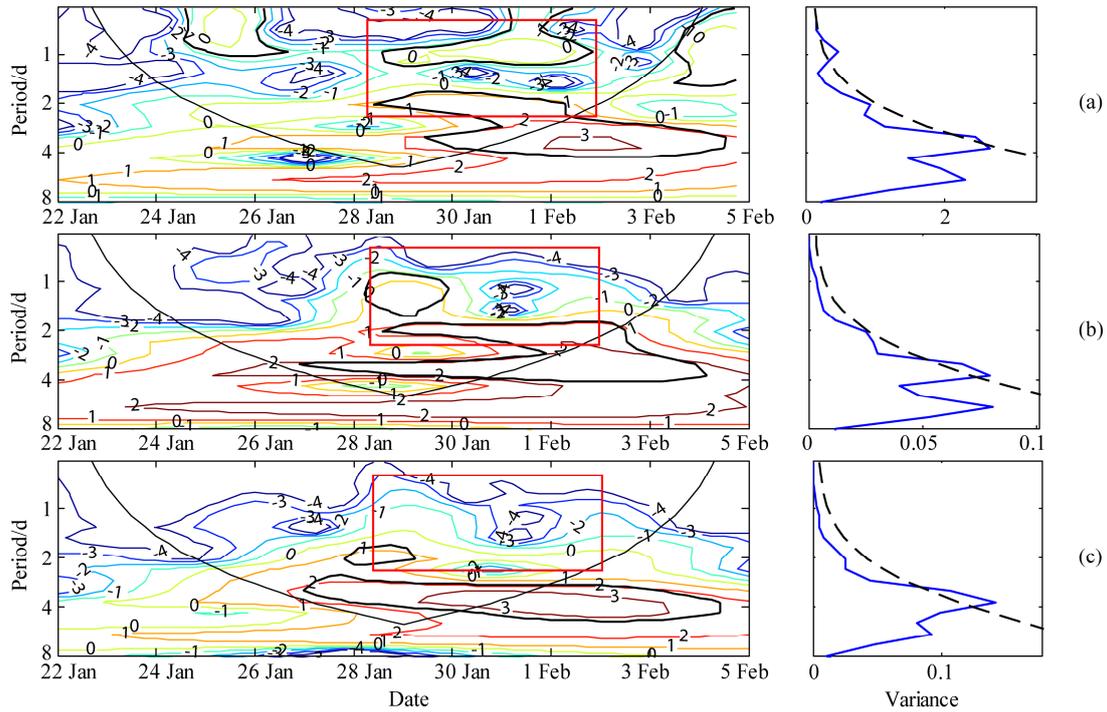


图 3 强降水 A 区降水小波功率谱(左)和小波方差(右): (a) 再分析降水; (b) SP 试验降水; (c) NOSP 试验降水。黑色粗实线及黑色虚线为 0.10 显著性水平检验线

Fig. 3 The wavelet for the time series of precipitation in region A: wave power spectrum (left) and wavelet variance (right). (a) Reanalysis data; (b) SP experiment; (c) NOSP experiment. The black thick line and the black dashed line represent the 0.10 significance level

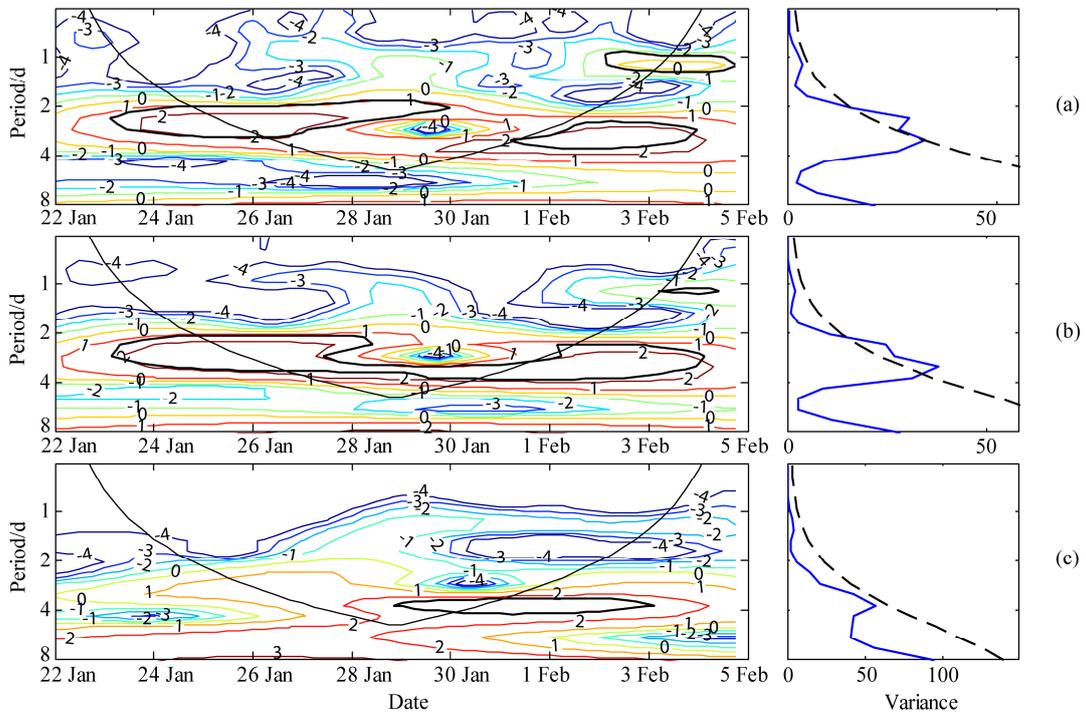


图 4 同图 3, 但为 850 hPa 经向风

Fig. 4 As in Fig. 3, but for the 850 hPa meridional wind

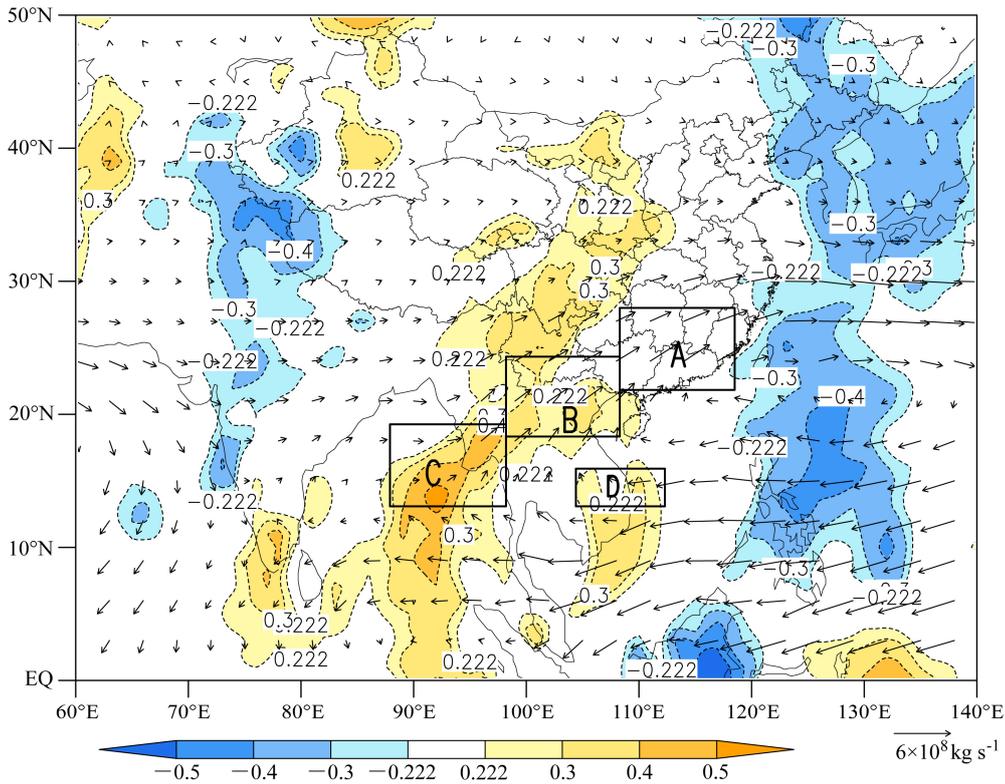


图 5 平均整层水汽通量(矢量箭头)和经向整层水汽通量  $q_v$  与 A 区降水超前 24 小时相关系数(阴影区代表相关系数通过 0.10 显著性检验)

Fig. 5 The averaged column water vapor transport flux (vectors) and correlation coefficient of the precipitation in region A with the previous 24 hours' column meridional water vapor transport flux (regions significant at the 0.10 significance level are shaded)

论——强西南水汽输送通道可能是 2008 年 1 月中国南方雨雪冰冻灾害形成的关键因素之一相一致。

从经向整层水汽通量  $q_v$  与 A 区降水超前 24 小时相关系数的高相关区分布情况以及过程平均的水汽输送通道来看,我国云南以南到越南地区、孟加拉湾东北部以及中南半岛东南部,存在着 3 个与 A 区高相关(通过 90%显著性检验)区域,说明这些地区的南北向水汽输送可能对于 24 小时后的 A 区降水有着较为重要的影响。若能把这 3 个高相关区中的某个或某几个的水汽输送信息引入模式模拟中,将会对模式降水模拟有很大程度的改善。

为了说明这一问题,先从各个高相关区的水汽输送周期特征角度进行分析。把上述高相关区划分成 3 个水汽通道关键区(考虑模式模拟区域位置): B 区:(18°~24°N, 98°~108°E); C 区:(13°~19°N, 88°~98°E); D 区:(13°~16°N, 104°~112°E)。

对上述水汽通道关键区在降水过程时段内的经向整层水汽通量分别做区域平均,形成区域经向

整层水汽通量六小时间隔的时间序列。通过小波分析 3 个关键区的周期特征可知, D 区经向整层水汽通量的主要周期为 2~4 天(图 6a),与 A 区的降水周期较为一致,而其他区域的周期信息(图略)与 A 区差别较大。进一步对 D 区水汽通量的 FNL 资料、SP 模拟结果和 NOSP 模拟结果进行对比分析,发现 SP 试验能够很好的模拟出 2~4 天这一显著周期信息(图 6b),而 NOSP 试验则没有显著的周期信息体现出来(图 6c)。结合前文 SP 试验对经向风场的改善分析,说明 SP 方法有可能把 D 区经向水汽通量的 2~4 天周期信息引入到 SP 模拟试验中。

从 A 区整层水汽通量散度的小波方差对比结果来看, NOSP 试验的显著周期为 4~6 天(图 7c),比实况周期偏长; SP 试验经过谱逼近方法的作用,降水 A 区的水汽收支周期向短周期调整,较好模拟出与实况一致的 2~4 天显著周期(图 7a、b)。

在 1 月 27 日、2 月 1 日、2 月 5 日,分别对比 SP 试验及 NOSP 试验的整层水汽通量与实况的差

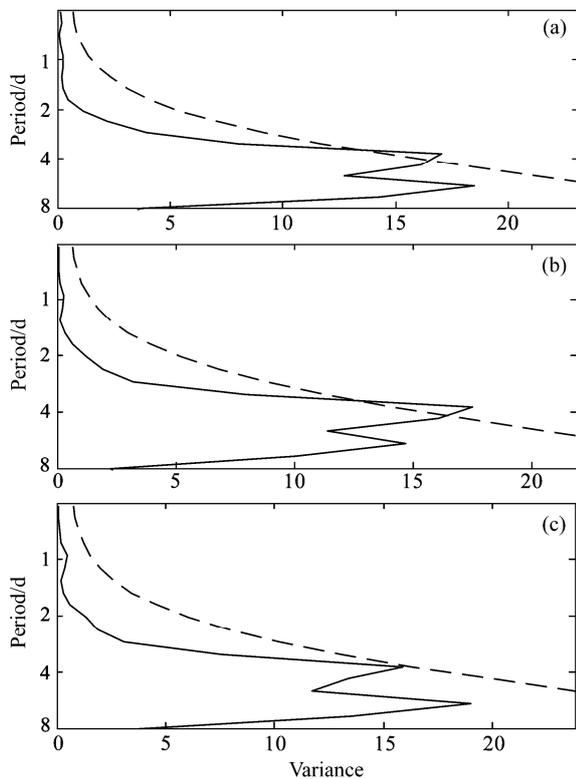


图6 D区经向整层水汽通量 $q_v$ 小波方差图: (a) FNL资料; (b) SP试验; (c) NOSP试验。虚线为0.10显著性检验线

Fig. 6 The wavelet variance of the column meridional water vapor transport flux in region D (dashed lines represent the 0.10 significance level): (a) FNL data; (b) expt SP; (c) expt NOSP

值场分布情况(图8)。结果表明,1月27日和2月1日的NOSP试验中,贵州、重庆附近地区有较大的经向偏差(图8d、e),从而导致该试验的降水区范围较实况偏北;2月5日,NOSP试验在我国南方沿海地区的较大反气旋性水汽输送偏差(图8f),使得该试验对于东南沿海的降水过程雨带空间分布模拟严重偏向西北。SP试验与实况的水汽通量差值总体较小且分布较为均匀(图8a、b、c),说明SP试验能够较准确的模拟出整层水汽通量的空间分布情况。

结合前文对过程平均的整层水汽输送通道、对比试验的模式区域位置以及3个水汽通道关键区的周期特征分析可知:谱逼近方法可能引入与降水A区高相关的中南半岛东部的经向整层水汽通量2~4天周期信息,使模式降水A区原本为4~6天的水汽收支周期调整为2~4天,和实际情况一致。数值模式对降水区水汽收支模拟的好坏,直接影响模式降水的模拟,这可能是SP试验能够改善降水

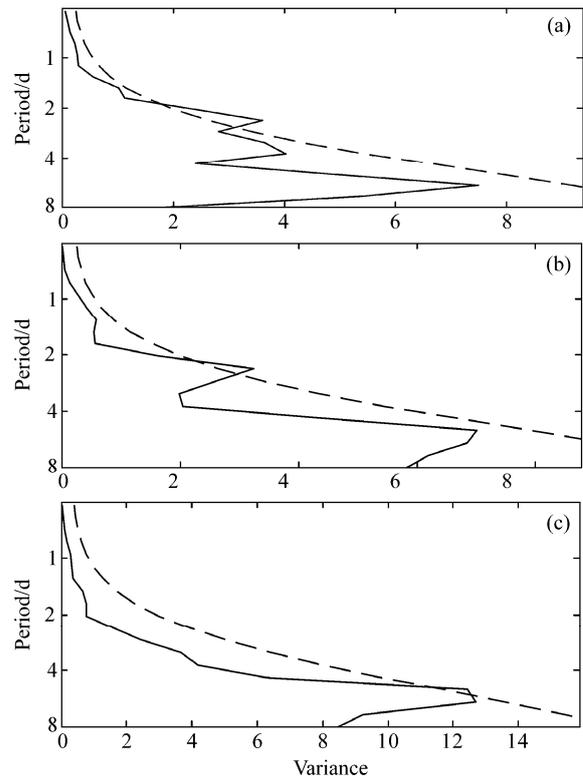


图7 同图6, 但为A区整层水汽通量散度

Fig. 7 As in Fig. 6, but for the column meridional water vapor transport flux divergence in region A

模拟结果的重要原因之一。本文仅从水汽输送周期信号的角度分析了谱逼近方法的外源强迫引入能力,而谱逼近方法可能还包含其他作用使得模式模拟结果改善,这有待开展后期工作进行更进一步的分析。

## 5 对比试验的统计检验

图9、图10和图11分别给出了内层嵌套区域在(18°~34°N, 100°~122°E)范围内,将SP试验(实线)和NOSP试验(虚线)在模拟时段内得到的纬向风场 $u$ 、经向风场 $v$ 和温度场 $t$ 插值成 $1^\circ \times 1^\circ$ 空间分辨率的资料,并在不同高度上进行空间ACC(红色)和RMSE(黑色)统计检验得到的结果。SP试验的200 hPa、500 hPa和850 hPa的纬向风场ACC系数较NOSP试验均有改善,分别能够达到最高0.08、0.37和0.23的提高(图9);经向风场最高能够达到0.14、0.26和0.58的提高(图10);温度场最高能够达到0.38、0.02和0.046的提高(图11)。

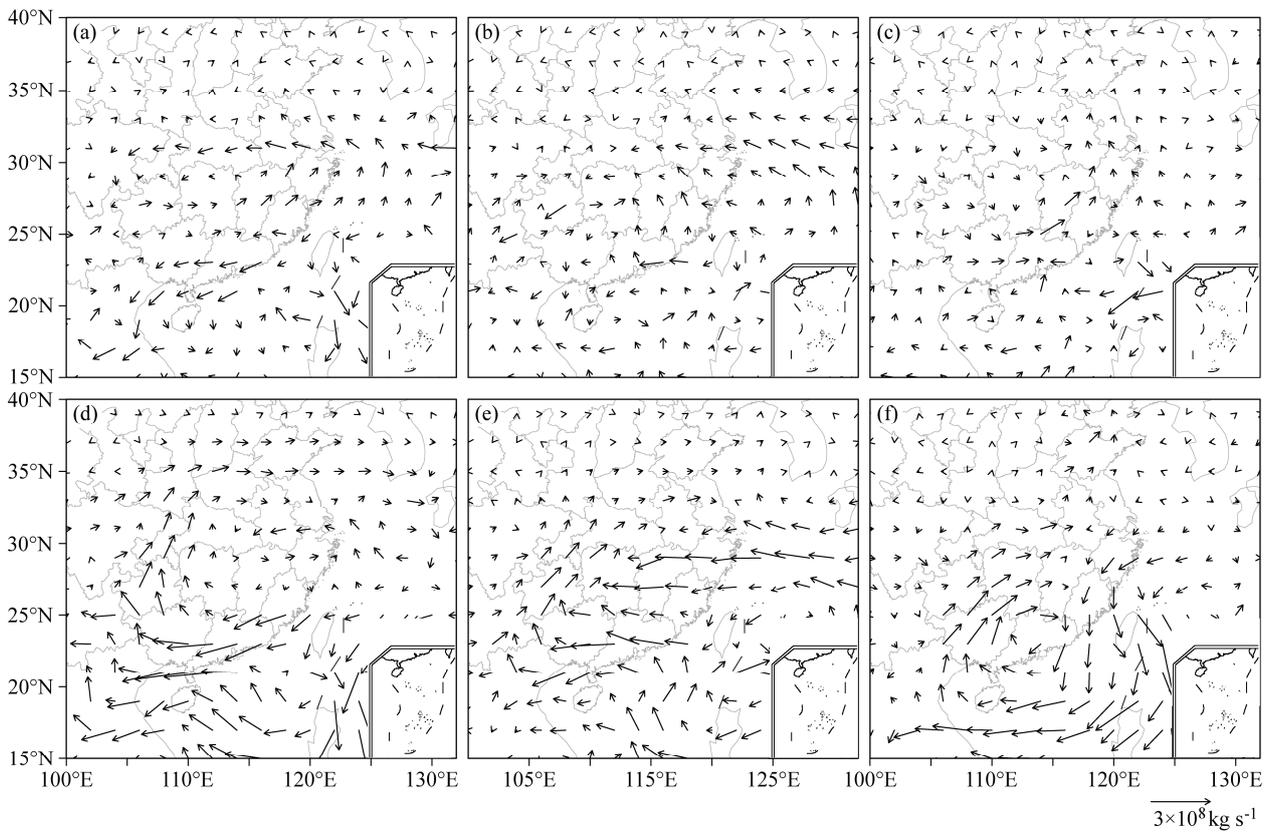


图 8 (a, d) 1 月 27 日、(b, e) 2 月 1 日、(c, f) 2 月 5 日整层水汽通量差值: (a-c) SP 试验-FNL 资料; (d-f) NOSP 试验-FNL 资料。单位:  $10^8 \text{ kg s}^{-1}$

Fig. 8 Column water vapor transport flux differences on (a, d) 27 January, (b, e) 1 February, and (c, f) 5 February: (a-c) Expt SP-FNL data; (d-f) expt NOSP-FNL data. Units:  $10^8 \text{ kg s}^{-1}$

统计结果显示, 预报第 4 天后 SP 试验较 NOSP 试验改善明显增强, 尤其在 850 hPa 和 500 hPa 上改善显著。200 hPa 较 850 hPa、500 hPa 改善不明显的原因, 可能和该层次原本模拟效果较好, 改善空间较小有关。虽然谱逼近方法添加的强迫项主要作用在垂直向的较高层面上, 但是经过模式各层之间的相互影响, SP 试验对于中层和较低层面上各要素的模拟也有改善效果。谱逼近方法的这一特性, 对于模式积分过程中在低层发展起来的虚假中小尺度系统可能具有抑制作用, 从而提高模式对中、低层天气状况的模拟水平, 进而改进天气系统以及降水的模拟准确性。

纬向风场和经向风场经过谱逼近处理, 在 ACC、RMSE 统计改善方面效果较好, 而温度场改进不明显, 这可能和本次试验的谱逼近方法只应用在风场上面有一定关系。虽然谱逼近方法没有直接应用于温度场的调整, 但从统计结果上看, SP 试验

模拟温度场在两周内也有不同程度提高, 说明经过模式内部变量之间的相互影响, 谱逼近方法也能够间接作用到其他变量中去。

## 6 总结与讨论

利用谱逼近方法对 2008 年初我国南方大范围持续性降水过程进行模拟对比试验, 探讨这一方法对两周内预报的改进能力, 结果发现: (1) 经过谱逼近方法处理的 SP 模拟试验, 能够有效描述持续性天气过程的降水落区与强度, 即对降水过程的雨带空间分布和降水强度的模拟明显优于没有使用谱逼近方法的 NOSP 试验; (2) 在低层 (850 hPa) 受槽线、风切变线等频繁影响的区域, SP 试验的经向风场对比 NOSP 试验有较好改善, 成功模拟出与实况较为一致的 2~4 天显著周期特征, 使得模式对于经向风场的模拟得到提高; (3) 综合分析过程平均的整层水汽输送通道、模式区域位置以及超前

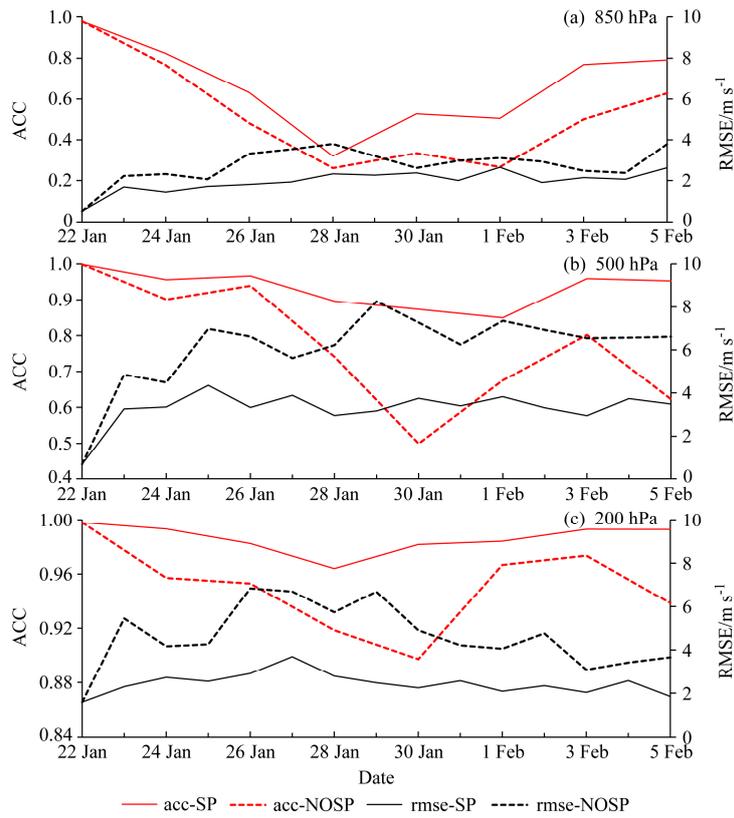


图9 纬向风 ACC (红色)、RMSE (黑色) 统计系数: (a) 850 hPa; (b) 500 hPa; (c) 200 hPa。实线为 SP 试验结果, 虚线为 NOSP 试验结果

Fig. 9 The abnormal correlation coefficient (ACC, red) and root-mean-square error (RMSE, black) of zonal wind: (a) 850 hPa; (b) 500 hPa; (c) 200 hPa. Solid line: expt SP; dashed line: expt NOSP

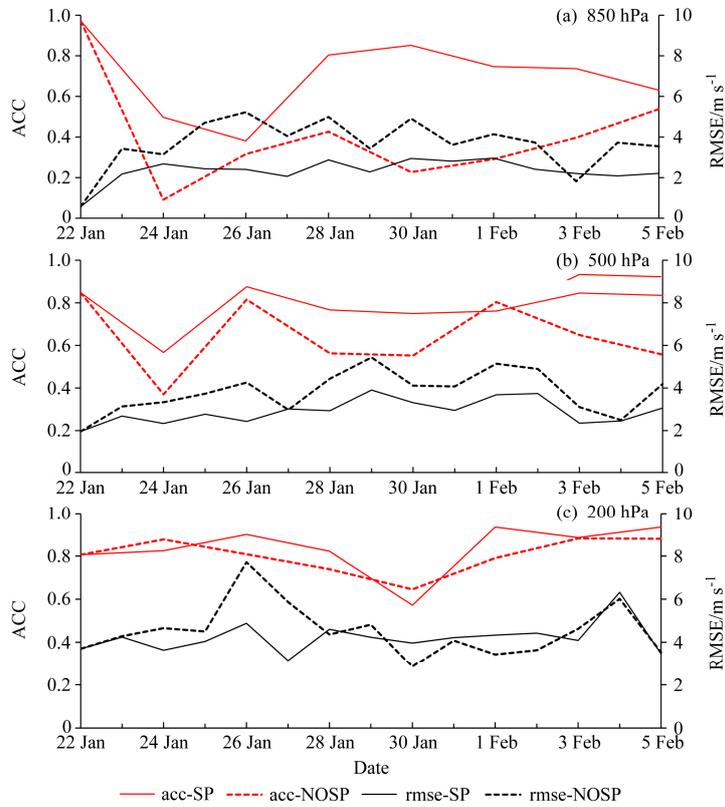


图10 同图9, 但为经向风

Fig. 10 As in Fig. 9 but for meridional wind

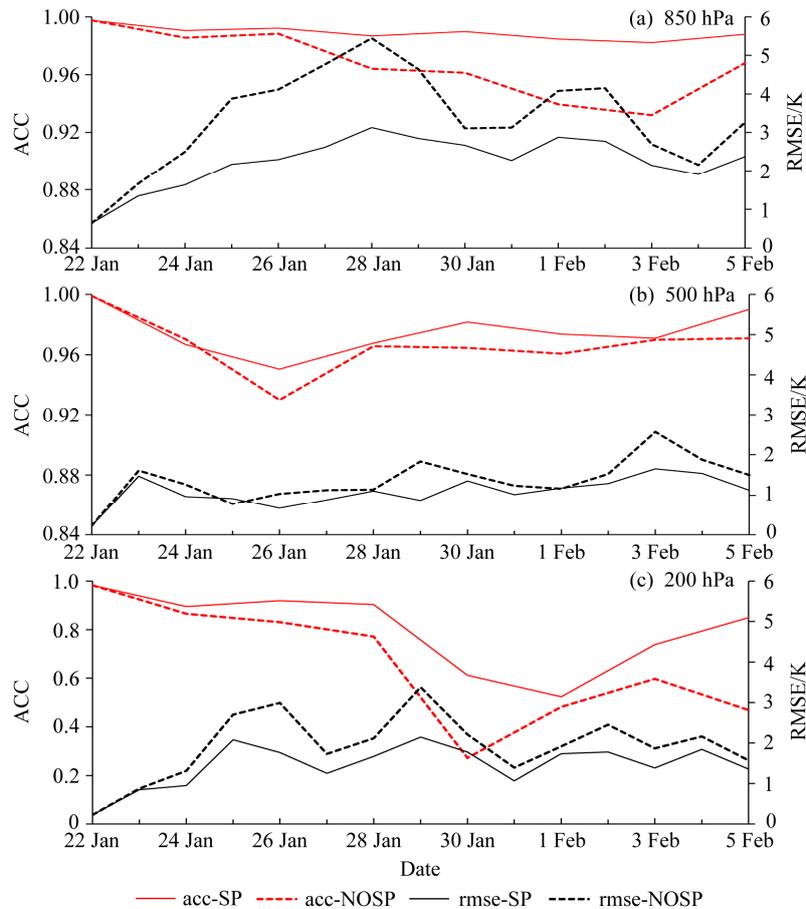


图 11 同图 9, 但为温度场

Fig. 11 As in Fig. 9 but for temperature

24 小时水汽通道高相关区的周期特征可知, SP 试验可能把中南半岛东部区域的经向水汽输送信息引入模式, 从而改善该试验对降水区水汽收支周期特征的模拟, 这可能是谱逼近方法改善 SP 试验降水模拟结果的重要原因之一; (4) 对于谱逼近方法没有直接作用的模式变量, SP 试验的模拟统计结果在两周内也有不同程度提高, 说明经过模式内部各个变量之间的相互影响, 谱逼近方法的调整作用可以延伸到其他变量中去。

本文研究结果表明, 使用谱逼近方法在 14 天模拟积分过程中通过添加特定的大尺度外源强迫项, 调制了模式与大尺度驱动场之间的协调关系, 从而提高模式模拟效果。此方法可能在模式数值预报中具有一定的实际使用价值。本文使用的大尺度外强迫场从 FNL 资料中提取出来, 具有较高可信度, 但在实际业务预报中只能用模式预报资料作为外强迫场, 其可信度有一定程度的降低, 因而在实际业务预报中谱逼近方法的效果如何, 有待进一步

研究。

本文只针对纬向风和经向风进行了谱逼近强迫的研究工作, 目前国内外研究中也大都只针对风场进行谱逼近强迫, 对风场之外的温度场等要素进行谱逼近强迫的改善效果将会在后期研究工作中展开。

## 参考文献 (References)

- Cha D H, Lee D K. 2009. Reduction of systematic errors in regional climate simulations of the summer monsoon over East Asia and the western North Pacific by applying the spectral nudging technique [J]. *J. Geophys. Res.*, 114 (D14), doi:10.1029/2008JD011176.
- Cha D H, Jin C S, Lee D K, et al. 2011. Impact of intermittent spectral nudging on regional climate simulation using Weather Research and Forecasting model [J]. *J. Geophys. Res.*, 116 (D10), doi:10.1029/2010JD015069.
- 车玉章. 2014. 改进 15 天以内数值天气预报的方法研究 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文. Che Yuzhang. 2014. A novel approach to improve the numerical weather prediction skills within 15 days [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- 丑纪范, 郑志海, 孙树鹏. 2010. 10~30 d 延伸期数值天气预报的策略思

- 考——直面混沌 [J]. 气象科学, 30 (5): 569–573. Chou Jifan, Zheng Zhihai, Sun Shupeng. 2010. The think about 10–30 d extended-range numerical weather prediction strategy—Facing the atmosphere chaos [J]. *Scientia Meteor. Sinica* (in Chinese), 30 (5): 569–573.
- Davies H C. 1976. A lateral boundary formulation for multi-level prediction models [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102 (432): 405–418, doi:10.1002/qj.49710243210.
- 何溪澄, 丁一汇, 何金海, 等. 2006. 中国南方地区冬季风降水异常的分析 [J]. 气象学报, 64 (5): 594–604. He Xicheng, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2006. An analysis on anomalous precipitation in southern China during winter monsoons [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 64 (5): 594–604, doi:10.11676/qxxb2006.058.
- Peng X D, Che Y Z, Chang J. 2013. A novel approach to improve numerical weather prediction skills by using anomaly integration and historical data [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (16): 8814–8826, doi:10.1002/jgrd.50682.
- Seaman N L, Stauffer D R, Lario-Gibbs A M. 1995. A multiscale four-dimensional data assimilation system applied in the San Joaquin Valley during SARMAP. Part I: Modeling design and basic performance characteristics [J]. *J. Appl. Meteor.*, 34 (8): 1739–1761, doi:10.1175/1520-0450(1995)034<1739:AMFDDA>2.0.CO;2.
- 施晓晖, 徐祥德, 程兴宏. 2009. 2008 年雪灾过程高原上游关键区水汽输送机制及其前兆性“强信号”特征 [J]. 气象学报, 67 (3): 478–488. Shi Xiaohui, Xu Xiangde, Cheng Xinghong. 2009. Premonitory of water vapor transport in the upstream key region over the Tibetan Plateau during the 2008 snowstorm disaster in South China [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 67 (3): 478–488, doi:10.11676/qxxb2009.048.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF version 3 [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-4751STR, 113pp, doi:10.5065/D68S4MVH.
- 宋寔, 汤剑平. 2011. 谱逼近方法在东亚夏季降水区域模式模拟中的适用性研究: 区域大小和位置的影响 [J]. 气象学报, 69 (2): 297–309. Song Shi, Tang Jianping. 2011. An application of the spectral nudging technique to the simulation of summer precipitation over East Asia using a regional climate model: The impact of domain size and position [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 69 (2): 297–309, doi:10.11676/qxxb2011.025.
- Stauffer D R, Seaman N L. 1990. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 118 (6): 1250–1277, doi:10.1175/1520-0493(1990)118<1250:UOFDDA>2.0.CO;2.
- Stauffer D R, Seaman N L. 1994. Multiscale four-dimensional data assimilation [J]. *J. Appl. Meteor.*, 33 (3): 416–434, doi:10.1175/1520-0450(1994)033<0416:MFDDA>2.0.CO;2.
- Stauffer D R, Seaman N L, Binkowski F S. 1991. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part II: Effects of data assimilation within the planetary boundary layer [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119 (3): 734–754, doi:10.1175/1520-0493(1991)119<0734:UOFDDA>2.0.CO;2.
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79 (1): 61–78.
- von Storch H, Langenberg H, Feser F. 2000. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128 (10): 3664–3673, doi:10.1175/1520-0493(2000)128<3664:ASNTFD>2.0.CO;2.
- Waldron K M, Paegle J, Horel J D. 1996. Sensitivity of a spectrally filtered and nudged limited-area model to outer model options [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124 (3): 529–547, doi:10.1175/1520-0493(1996)124<0529:SOASFA>2.0.CO;2.
- 王东海, 柳崇健, 刘英, 等. 2008. 2008 年 1 月中国南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因的初步分析 [J]. 气象学报, 66 (3): 405–422. Wang Donghai, Liu Chongjian, Liu Ying, et al. 2008. A preliminary analysis of features and causes of the snow storm event over the southern China in January 2008 [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 66 (3): 405–422, doi:10.11676/qxxb2008.038.
- 王凌, 高歌, 张强, 等. 2008. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 I. 气候特征与影响评估 [J]. 气象, 34 (4): 95–100. Wang Ling, Gao Ge, Zhang Qiang, et al. 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in South China during January 2008. I. Climatic features and its impact [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 34 (4): 95–100.
- 王启光. 2012. 数值模式延伸期可预报分量提取及预报技术研究 [D]. 兰州大学博士学位论文. Wang Qiguang. 2012. The research of extracting predictable components and the forecasting techniques in extended-range numerical weather prediction [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University.
- Wang Y, Qian H, Song J J, et al. 2008. Verification of the T213 global spectral model of China National Meteorology Center over the East-Asia area [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D10), doi:10.1029/2007JD008750.
- 杨贵名, 孔期, 毛冬艳, 等. 2008. 2008 年初“低温雨雪冰冻”灾害天气的持续性原因分析 [J]. 气象学报, 66 (5): 836–849. Yang Guiming, Kong Qi, Mao Dongyan, et al. 2008. Analysis of the long-lasting cryogenic freezing rain and snow weather in the beginning of 2008 [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 66 (5): 836–849, doi:10.11676/qxxb2008.076.
- 曾先锋, 周天军. 2012. 谱逼近方法对区域气候模式性能的改进: 不同权重函数的影响 [J]. 气象学报, 70 (5): 1084–1097. Zeng Xianfeng, Zhou Tianjun. 2012. Impact of the spectral nudging on the simulation of a regional climate model: Different weight function [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 70 (5): 1084–1097, doi:10.11676/qxxb2012.091.
- 郑志海. 2010. 基于可预报分量的 6~15 天数值天气预报业务技术研究 [D]. 兰州大学博士学位论文. Zheng Zhihai. 2010. Operational technology research of 6–15 days numerical weather prediction based on predictable components [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University.