

董美莹,陈锋,冀春晓,2019.不同要素谱逼近对高分辨区域数值模式梅雨模拟的改进[J].气象,45(5):593-605. Dong M Y, Chen F, Ji C X, 2019. Improving the Meiyu simulation using spectral nudging of single-element and multi-element in high-resolution regional numerical model[J]. Meteor Mon, 45(5):593-605(in Chinese).

## 不同要素谱逼近对高分辨区域数值模式 梅雨模拟的改进\*

董美莹 陈 锋 冀春晓

浙江省气象科学研究所,杭州 310008

**提 要:**为改进高分辨率区域数值天气预报模式雨带模拟偏差,利用 WRF 模式探讨了不同要素及其组合谱逼近方法对 2015 年浙江典型梅雨天气预报性能的影响。结果表明:(1)不同单要素逼近对梅雨模拟效果影响差异明显,风场逼近对模拟结果改进较大,高度场逼近对结果略有改善,而温度场逼近主要表现为负效应;风场组合了其他要素的逼近效果与单要素类似,故将水平风场谱逼近确定为最优方案。(2)最优方案对梅雨期间形势场各要素改进程度的排序为纬向风、经向风、相对湿度、温度场和高度场;三个特征层 850、500、200 hPa 各要素平均的均方根误差(相关系数)分别降低了(增加了)24.1%(13.6%)、22.7%(21.7%)和 13.0%(12.2%);且改进幅度随预报时效的延长而增加,这主要与区域模式内部大尺度系统的误差随积分时间增长有关。(3)典型个例分析显示,最优方案在较好订正低层风场及切变线动力条件的基础上,经过数值模式各物理过程的协同积分也修正了高湿区等关键热力因子,最终改进了高分辨率区域模式的梅雨模拟。

**关键词:**谱逼近,高分辨,区域数值模式,梅雨,模拟

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.05.001

## Improving the Meiyu Simulation Using Spectral Nudging of Single-Element and Multi-Element in High-Resolution Regional Numerical Model

DONG Meiyong CHEN Feng JI Chunxiao

Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310008

**Abstract:** To improve the simulation in precipitation location, the impact from spectral nudging (SN) technique of single-element and multi-elements on the Meiyu weather simulation are investigated by using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. The results show that: (1) the contributions of SN with different meteorological elements and their combination to Meiyu simulation are obviously different. On the whole, the SN with wind field obviously improves Meiyu precipitation simulation, while there is a little benefit and even deterioration in SN with geopotential height and temperature, respectively. Also, it is the similar effect in simulations with multi-elements SN. Therefore, the spectral nudging with wind field is chosen as the optimal scheme for the following analysis. (2) During Meiyu period, the sort of improvement in synoptic elements is zonal wind, meridional wind, humidity, temperature and geopotential height. On average, compared to the control experiment, the root mean square error (correlation coefficient) of all

\* 浙江省气象科技计划重点项目(2017ZD04)、浙江省科技计划项目(2017C03035)、国家气象科技创新工程“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”、华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ201805、QYHZ201611)及浙江省气象局青年科技项目(2017QN05)共同资助  
2018年5月3日收稿; 2018年8月29日收修定稿

第一作者:董美莹,主要从事台风、暴雨等灾害性天气研究. Email: dongmy\_zj@163.com

elements decreases (increases) by about 24.1% (13.6%), 22.7% (21.7%) and 13.0% (12.2%) at 850 hPa, 500 hPa, and 200 hPa in the optimal experiment respectively. Meanwhile, the longer lead time is, the better improvement could be in the simulation, which is related to larger-scale error growth in interior domain with the integration time. (3) Typical case diagnosis illustrates that wind field spectral nudging can amend efficiently the dynamic factors such as low-level wind shear line, and thus correct the key thermodynamic factors like high humidity region by physical process interaction and modulation during integration, which could result in the better simulation in Meiyu event finally.

**Key words:** spectral nudging, high resolution, regional numerical model, Meiyu, simulation

## 引 言

有目共睹,由美国国家大气研究中心(NCAR)联合国家环境预报中心(NCEP)等多家研究机构开发的 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式作为一个公共模式,因其良好的性能和通用性以及版本的不断改进在全球范围内取得广泛的应用 (Michalakes et al, 2001; Hong et al, 2004; 章国材, 2004; Skamarock et al, 2008; Aggarwal and Kumar, 2013; 姚爽等, 2015; 王佳等, 2017)。WRF 高分辨率区域数值天气预报模式已成为当前精细化现代天气预报的一个重要基础工具,在国内外业务单位得到广泛应用,表现出非凡潜力 (Benjamin et al, 2004; 2010; Done et al, 2004; 范水勇等, 2008; Lee et al, 2010; 段旭等, 2011; Cavallo et al, 2013; 陈葆德等, 2013; 李泽椿等, 2014; Powers et al, 2017)。浙江省高分辨率区域数值天气预报业务取得可喜进展 (陈锋等, 2012; 邱金晶等, 2015), 然而应用评估也表明,系统存在整体雨带位置预报不如其驱动模式——全球模式这一局限。初步分析认为: 尽管区域数值模式已经设立缓冲区的侧边界方案来协调区域模式与大尺度强迫场之间的差异 (Davies, 1976; Skamarock et al, 2008), 然而这一方案没有考虑到大尺度偏差在高分辨率区域数值预报模式区域内部也是会有发展的, 区域数值预报模式因为有限区域的限制, 对大尺度波的识别和主要现状描述能力不如全球模式, 从而导致模拟区域内部误差发展。

早在 1996 年, Waldron et al (1996) 提出谱逼近的思想, 利用谱滤波的方式, 把大气大尺度信息添加到区域数值模式模拟区域中, 而不仅仅是通过侧边界强迫。谱逼近思想提出以来, 在区域气候模拟方面得到了广泛应用 (von Storch et al, 2000; Miguez-

Macho et al, 2004; Cha and Lee, 2009; 宋寔和汤剑平, 2011; Hong et al, 2012; Shan et al, 2012; Spero et al, 2014; Choi and Lee, 2016), von Storch et al (2000) 通过 3 个月的模拟试验证明谱逼近方法既可使区域模式模拟在大尺度上接近驱动场, 又不会阻止区域模式内部中小尺度特征的发展, 并提出谱逼近技术可视为一种数据间接同化技术。Cha and Lee (2009) 用模式风场谱逼近方法较好改善了 1998 年我国夏季降水的气候模拟。曾先锋和周天军 (2012) 在 RegCM3.0 模式中采用谱逼近方法有效校正了 2003 年江淮梅雨期环流形势和梅雨锋位置。Spero et al (2014) 在 WRF 模式中利用新发展的绝对比湿谱逼近技术改进了其对于云、辐射和降水的 20 年气候模拟。近年来, 也有研究开始将谱逼近技术应用于天气过程的模拟, Cha and Wang (2013) 通过谱逼近技术有效修正了初始场的大尺度环境场进而实现了 WRF 模式对于 2010—2011 年西北太平洋台风路径及强度模拟的改善。王淑莉等 (2016) 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, 结果显示使用谱逼近方法可以改进 WRF 模式经向风场和水汽输送的模拟, 从而明显改进了雨带空间分布和降水强度。

已有研究进展表明, 尽管谱逼近技术在区域气候研究领域取得长足进展, 然而在天气过程研究领域的工作较少, 特别对于几千米级别高分辨率中尺度模式和不同要素及其组合谱逼近方法的可能影响探讨甚少。因此, 考虑谱逼近方法的设计优势和已有成果的启示, 本文以 2015 年浙江典型梅雨过程为例, 开展多要素谱逼近方法对于高分辨率区域中尺度数值天气预报模式梅雨预报性能的影响评估; 以期加深对谱逼近方法的适用性认识, 为高分辨率数值预报技术的改进提供参考和思路。

# 1 方法和资料

## 1.1 谱逼近方法简介

谱逼近的基本原理是把区域数值模拟作为一种“降尺度”问题来处理(Waldron et al, 1996),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,从而减小区域模式变量与全球模式驱动场之间的偏差。谱逼近是一个具有尺度选择性的动力张弛逼近方案,它一方面要求区域模式模拟结果中的较大尺度波动趋近于强迫驱动场,一方面允许较小尺度的波动在区域模式中自由发展。同时,谱逼近技术在区域模式内部引入了强迫场的大尺度信号,这可以减少区域模式在侧边界附近的信号失真,从而有效降低区域数值模式性能对于模拟区域大小和位置的依赖性(Miguez-Macho et al, 2004; 2005; 宋寔和汤剑平, 2011; 曾先锋和周天军, 2012)。

谱逼近方法假设:在较大尺度大气系统的解析表达上,无边界的全球数值模式相比有边界的有限区域数值模式存在优势,因此从大气运动尺度谱空间的角度,通过对区域数值模式中的预报方程中增加一个修正项来减少区域数值模式的误差。如式(1)所示

$$\frac{\partial P}{\partial t} = F(P) + \alpha(P_G^L - P_R^L) \quad (1)$$

式中,  $P$  是区域模式的预报量,  $F$  是模式算子,  $\alpha$  是逼近系数,  $P_G^L$  和  $P_R^L$  分别是全球模式驱动场和区域模式模拟的大尺度分量, 式中右端第二项为修正项。该修正项主要与截断波长下滤波得到的模式与强迫场大尺度分量的差值和逼近系数有关, 截断波长的选取主要根据区域模式欲引入的强迫目标波长来确定, 模式只对大于等于截断波长的波动信息进行处理; 引入强迫波长信号的强弱通过  $\alpha$  逼近系数这一

权重来控制。在 WRF 模式中, 通过傅里叶变换滤波技术分离出全球模式驱动场的纬向、经向较大尺度波动信息  $P_G^L$  和区域模式模拟的纬向、经向大尺度波动信息  $P_R^L$ , 从而对预报量实现在纬向和经向的谱逼近订正。

## 1.2 模式配置和试验设计

基于浙江省中尺度区域数值预报业务模式的基本框架(陈锋等, 2012), 本研究选用 WRF-ARW V3.4.1 (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users>; Skamarock et al, 2008) 为预报模式, 采用双重嵌套网格, 水平分辨率各为 9、3 km, 格点数为  $265 \times 265$  与  $205 \times 187$ , 垂直层数为 36 层, 模式顶高为 10 hPa(图 1)。模式使用的主要物理参数化方案有 WSM 6-Class 云微物理方案(Hong et al, 2004), RRTMG 短波和长波辐射方案(Iacono et al, 2008), 基于 Monin-Obukhov 的 MM5 相似理论表面层方案, YSU 行星边界层方案(Hong et al, 2006), 以及 Noah 陆面过程方案(Chen and Dudhia, 2001)。

为探讨不同要素逼近对梅雨期预报性能的影响, 同时考虑运行效率, 针对本文关注的浙江重大灾害性天气——梅雨, 选择近年来梅雨特征最为明显的 2015 年为例。2015 年浙江 6 月 7 日入梅, 比常年(6 月 10 日)略早, 7 月 12 日出梅, 比常年(7 月 10 日)略晚, 共出现 4 轮降水集中期, 梅期共 35 d, 比常年偏多 5 d; 梅雨量达 472 mm, 比常年偏多 57%。评估时段确定为 2015 年 6 月 6 日 12 时(UTC, 下同)至 2015 年 7 月 10 日 00 时。本研究设计了控制试验(CTL)和两组敏感性数值试验(表 1)。CTL 未作任何要素的谱逼近。第一组为单要素逼近敏感性试验, 包括水平风(SNUV)、位势高度(SNH)、温度(SNT)三个试验。然后, 通过对降水预报效果评估, 初步确定出第一组试验中占优方案——风场单

表 1 试验设计

Table 1 Experiment design

序号	试验类别	试验名称	说明
1	控制试验	CTL	未作任何要素的谱逼近
2	单要素逼近 敏感性试验	SNUV	增加了经向风和纬向风的谱逼近
3		SNH	增加了高度场的谱逼近
4		SNT	增加了温度场的谱逼近
5	多要素逼近 敏感性试验	SNUVH	增加了经向风、纬向风和高度场的谱逼近
6		SNUVT	增加了经向风、纬向风和温度场的谱逼近
7		SNUVHT	增加了经向风、纬向风、温度场和高度场的谱逼近

要素。由于大气之间各要素的相互作用是复杂非线性相互作用,为此,本文设计了基于风场和其他要素的第二组组合试验,包括水平风与位势高度组合(SNUVH)、水平风与温度组合(SNUVT),以及水平风与位势高度和温度组合(SNUVHT)三个试验。接着,进一步开展降水预报效果评估,最终确定出最优谱逼近方案——风场单要素逼近方案。

在此基础上,为进一步了解谱逼近方案的影响过程,文中分析了最优谱逼近试验对于梅雨期间形势场基本要素(经向风、纬向风、高度、温度和相对湿度)的影响。最后,通过典型个例展示了最优谱逼近方案改进模拟效果的具体过程。所有试验均积分 72 h,敏感性试验除了增加相关要素谱逼近外,其他试验设计与 CTL 完全相同。本研究中,考虑了大气数值模式的最高有效分辨尺度一般为 5 倍格局(Skamarock, 2004; 郑永骏等, 2008),即 FNL 驱动场的最高有效分辨尺度约 500 km;参照 von Storch et al(2000)和 Tang et al(2010)采用的滤波标准,同时结合浙江区域数值模式特点和天气气候特征,对波长大于 500 km 的 2、3、4 不同波数截断谱逼近做了调试选优,最终确定截断波数为 3 波,截断波长约 800 km( $9 \text{ km} \times 264 \div 3 = 792 \text{ km}$ )。所有敏感性试验均在第一重嵌套区域进行纬向和经向 3 波以下长波谱逼近,垂直方向上在模式层 8 层(约 850 hPa)及以上层次进行谱逼近。逼近系数  $\alpha$  使用了 WRF 模式中的推荐值 0.0003,相当于 55.6 min 的  $e$  折阻尼衰减时间。逼近时间频率选为 6 h。

### 1.3 资料

研究使用的资料包括再分析资料、区域数值模式预报资料和实况观测资料。再分析资料取自美国国家环境预报中心全球预报模式最终分析资料(NCEP Final Operational Global Analysis data, ht-

tps://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/),作为区域数值模式初始场和边界条件,即为谱逼近驱动场的大尺度谱数据来源。实况观测资料用于检验模式预报性能,取自浙江省气象局信息网络中心的自动站数据库,包括了浙江省约 2000 个站点观测资料(包括 3 个基准站、20 个基本站、47 个一般站和近 2000 多个区域自动站)。考虑资料的匹配性,利用反距离加权插值法将全省各站点资料插值到预报场格点上,然后得到实况格点场用于最终模式检验。逐 12 h 评估一次 24 h 累计降水预报性能。

## 2 结果分析

为全面评估谱逼近方法对于梅雨天气预报性能影响,本文从降水、形势场和典型个例的预报三个方面进行评估分析,采用的统计评分参数有均方根误差(RMSE)、空间相关系数(CC)和 TS、ETS(Equitable Threat Score)、HSS(Heidke Skill Score)等检验量(丁金才, 1995; Gotway et al, 2009)。

### 2.1 谱逼近对降水预报的影响

单要素敏感性试验梅雨期间 24 h 累计降水均方根误差和空间相关系数的统计平均显示(表 2),不同要素逼近对于降水影响存在明显差异。风场逼近试验(SNUV)效果最好,在各预报时效下的 RMSE 均比 CTL 低,而 CC 均比 CTL 试验高;高度场逼近试验(SNH)影响很小,误差和空间分布和 CTL 大致相当;温度场逼近则导致了 RMSE 的增加和 CC 的降低。以 CTL 的评估参数(RMSE、CC 等)为基准,计算各参数的增量百分率(敏感性试验减去 CTL 后除以 CTL)来进一步分析敏感性试验的影响效果。由图 2 可见,风场谱逼近的正效应明显,72 h 预报时效 RMSE 的减少率可达 15.3%,空

表 2 各试验 24 h 累计降水评估

Table 2 Evaluation of 24 h accumulated precipitation for all experiments

评估参数	提前量/h	试验名称						
		CTL	SNUV	SNH	SNT	SNUVH	SNUVT	SNUVHT
RMSE/mm	24	19.77	<b>18.02</b>	20.05	22.02	18.06	19.25	19.43
	48	20.26	<b>17.86</b>	20.49	21.49	18.26	19.66	19.39
	72	20.81	17.62	20.49	21.09	<b>17.18</b>	19.47	19.79
	24	0.306	<b>0.328</b>	0.306	0.292	0.324	0.311	0.307
CC	48	0.283	<b>0.355</b>	0.286	0.213	0.348	0.288	0.306
	72	0.239	<b>0.365</b>	0.243	0.214	0.359	0.276	0.274

注:粗体部分示意最佳方案。

Note: Bold number denotes the best scheme.

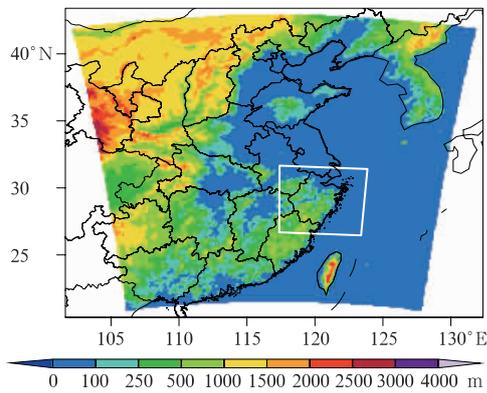


图 1 模式模拟区域设置和地形高度(阴影)  
(内、外区域水平格距分别为 9、3 km,  
白色框线示意内区域)

Fig. 1 Configuration of the model domain  
and topography (shaded area)  
(The outer domain corresponds to the 9 km  
horizontal resolution, and the inner domain  
with white frame has 3 km resolution)

间 CC 的增加率为 50%(图 2a, 2b), 各时效平均下 RMSE 和空间 CC 的改进率分别为 12.0% 和 28.5%; 高度场逼近影响较小, 改进率均低于在 2%; 而温度场逼近则主要表现为负效应。结合 TS、ETS 及 HSS 评分可以得到类似上述结论(表 3), SNUV 的在各级降水和各个提前预报时效下的评分全面优于其他两种逼近方案和 CTL, 平均而言, SNUV 对于 TS、ETS 和 HSS 评分的改进率分别为 18.6%、44.4% 和 41.2%(图 2)。此处风场谱逼近的改进作用与前人对于区域气候降水及天气降水研究结果相类似(Cha and Lee, 2009; Tang et al, 2010; 宋寔和汤剑平, 2011; 曾先锋和周天军, 2012; Shan et al, 2012; 王淑莉等, 2016; Hong et al, 2012), 风场要素逼近是实现大气动力谱逼近的一个十分有效方法。

从多要素组合敏感性试验得出的 RMSE 和 CC 显示(表 2), 各组合谱逼近方案均可以改进降水的模拟强度和空间分布, 比较而言, 三种组合方案中风场与高度场组合的 SNUVH 试验改进效果明显优于其他两种方案。结合相应的 TS、ETS 和 HSS 评分也表明(表 3), 三种组合方案中仅有 SNUVH 试验在各个提前预报时效和各等级降水的评分全面优于 CTL。总体平均而言, SNUVH 试验对于 CTL 试验的 RMSE、CC、TS、ETS 和 HSS 评分改进率依次为 12.0%、26.4%、17.0%、41.2% 和 37.8%。对

比单要素最优逼近试验 SNUV 和多要素组合方案中最优试验 SNUVH 结果可知, 尽管在单要素逼近试验中高度场逼近对模拟结果是有改善的, 但是增加了高度场的组合试验并未进一步改进模拟效果, 反而是略有降低, 这也反映出了大气各要素相互作用的复杂性。

通过上述分析, 本文确定风场单要素逼近方案 SNUV 为最优方案, 下文将对此方案下降水得到改

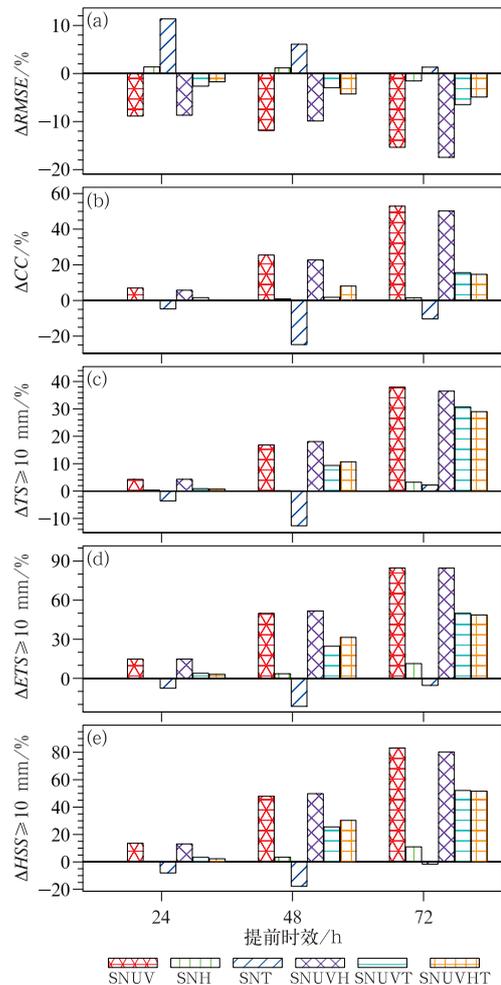


图 2 敏感性试验相对控制试验 24 h 累计降水模拟的(a)RMSE, (b)CC 和中雨以上(c)TS, (d)ETS, (e)HSS 评分的差异百分比

(敏感性试验减去控制试验后除以控制试验)

Fig. 2 Percentage of differences between sensitive experiments listed in Table 1 and control run (the former minus the latter and then divide the latter) in statistics of (a) RMSE, (b) CC, (c) TS, (d) ETS and (e) HSS for 24 h accumulated precipitation (the three scores obtained from rainfall greater than 10 mm)

表 3 各试验 24 h 累计降水统计评分  
Table 3 Statistics scores of 24 h accumulated precipitation for all experiments

评估参数	提前量 /h	量级 /mm	试验名称						
			CTL	SNUV	SNH	SNT	SNUVH	SNUVT	SNUVHT
TS	24	≥0.1	0.762	0.765	0.762	0.758	0.765	<b>0.768</b>	<b>0.768</b>
		≥10	0.373	<b>0.389</b>	0.375	0.36	<b>0.389</b>	0.377	0.376
		≥25	0.195	<b>0.202</b>	0.192	0.178	<b>0.202</b>	0.19	0.188
		≥50	0.064	0.068	0.065	0.055	<b>0.069</b>	0.061	0.061
	48	≥0.1	0.739	<b>0.767</b>	0.735	0.728	<b>0.767</b>	0.78	0.781
		≥10	0.326	0.381	0.327	0.285	<b>0.385</b>	0.357	0.361
		≥25	0.165	<b>0.198</b>	0.168	0.115	0.194	0.157	0.164
		≥50	0.059	<b>0.089</b>	0.061	0.043	0.072	0.05	0.056
	72	≥0.1	0.709	0.771	0.71	0.715	0.768	<b>0.773</b>	0.771
		≥10	0.28	<b>0.386</b>	0.289	0.286	0.382	0.366	0.361
		≥25	0.137	<b>0.197</b>	0.139	0.117	<b>0.197</b>	0.155	0.153
		≥50	0.064	0.081	0.064	0.037	<b>0.088</b>	0.043	0.051

注:粗体部分示意最佳方案。

Note: Bold numbert denotes the best scheme.

进过程做进一步探讨。结合和 SNUV 试验相对控制试验的 CC 和 RMSE 的差异逐时次变化可知(图 3a,3b),约有 65%时次得到改进,而约 35%时次是变差的,总体上净优化率约 30%;TS、ETS 和 HSS 的评分也大致如此(图 3c,3d),以中雨以上 HSS 得分为例,占优频次达 70.6%(图 3d)。因此可以说最优方案的改进效果是比较稳定的。为进一步理解谱逼近方案改进的物理过程,下面将该方案对于梅雨期天气形势的影响进行分析。

## 2.2 最优方案对形势场的影响

选用 CTL 和 SNUV 试验进行评估,逐 12 h 计算一次 FNL 的再分析场与各试验预报场的风场、温度、高度及湿度场的 RMSE 和空间 CC 来做对比分析,其中 FNL 的再分析场通过 WRF 模式的前处理模块插值到区域模式的预报格点上。

分析 SNUV 相对 CTL 各评估参数的增量百分比显示(图 4):一方面,风场逼近对不同气象要素的影响程度不同,总体上影响由大到小的排序为纬向风、经向风、相对湿度、温度场和高度场。这说明动力场的强迫逼近十分有效,即使做了单一风场要素的谱逼近,该要素能通过数值模式中物理过程在各要素之间发生相互作用,比如风场逼近通过大气散度场的改变来影响水汽的水平 and 垂直输送,从而影响水汽场分布,进而影响水汽凝结等微物理过程和降水过程等。这些物理过程进一步会影响和调整其他气象要素,从而有效引入较完整的大尺度目标波长信号到区域数值模式中。另一方面,各要素在对流层整层得到改善,但不同要素影响程度在垂直方

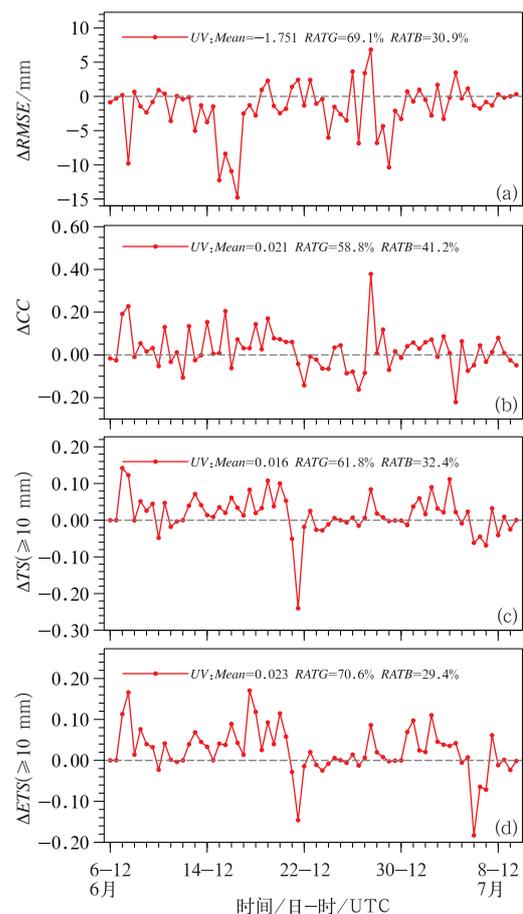


图 3 2015 年 6 月 6 日至 7 月 10 日梅雨期间最优谱逼近试验相对控制试验 24 h 累计降水模拟的(a)RMSE 和(b)CC,中雨以上(c)TS 和(d)HSS 评分的差异(最优试验减去控制试验)的逐 12 h 变化  
Fig. 3 The 12 h evolution of differences between SNUV experiment and control run (the former minus the latter) in statistics of (a) RMSE, (b) CC, (c) TS and (d) HSS for 24 h accumulated precipitation (the two scores obtained from rainfall greater than 10 mm)

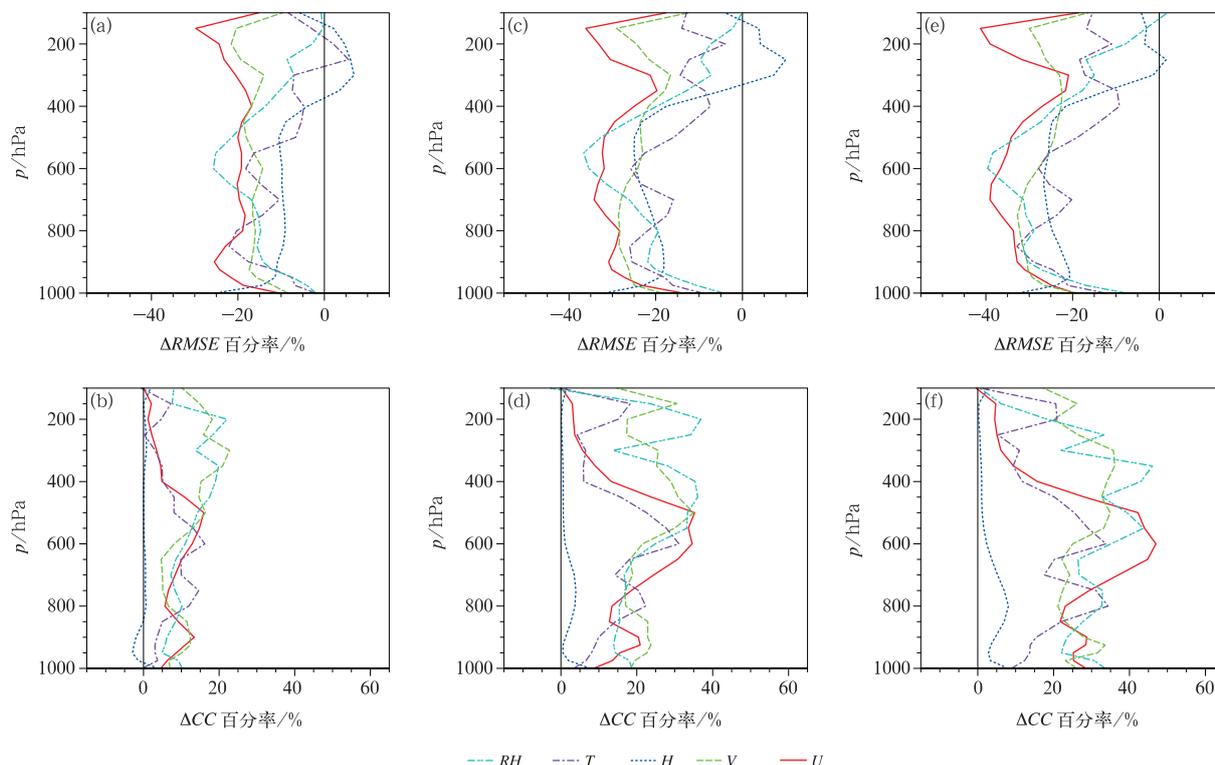


图 4 不同提前量(a,b)24 h,(c,d)48 h,(e,f)72 h 下,最优谱逼近试验相对控制试验各要素模拟(a,c,e)RMSE 和(b,d,f)CC 的差异百分率(最优试验减去控制试验除以控制试验)区域平均垂直廓线

Fig. 4 Mean profiles of difference percentages between SNUV experiment and control run (the former minus the latter and then divide the latter) in statistics of (a, c, e) RMSE and (b, d, f) CC for meteorological elements with lead time of (a, b) 24 h, (c, d) 48 h and (e, f) 72 h

向存在明显差异。就 RMSE 增量百分率而言,除了水平风场均方根误差最大改进幅度出现在对流层高层(这可能与高空急流和较大尺度波长关系密切有关)外,其他要素较明显影响都在对流层中下层,比如湿度场的最大增量百分率在中层 600 hPa 附近,而温度场则多在对流层低层 850 hPa。从空间相关系数的增量比看,除了高度场影响很小外,其他要素分布态势在各层均有明显改进。

结合 FNL 资料各要素的垂直廓线(图 5a~5c)和各试验模拟要素与其差值(图 5d~5f)可知,风场谱逼近方案主要修正了对流层中层西南风的低估和高层西北风的高估,以及中低层湿度场低估现象。结合浙江梅雨期间天气特点,不难推论,由于高层西北风模拟偏强和中层西南气流偏弱,有助于引导低层梅雨锋切变线等降水系统南压移速加快,从而使得高湿系统在浙江维持时间偏短,大气湿度偏低;而低层切变线位置往往和梅雨雨带位置比较一致(朱

乾根等,2000),这可能是导致目前业务模式梅雨雨带模拟偏差的一个重要原因。因此,谱逼近对于对流层高层西北风高估、中层西南风低估和中低层湿度场低估的修正有效改进了梅雨雨带模拟。

天气学原理表明,850、500、200 hPa 三个特征层形势场与梅雨形成的三个关键系统——低层切变线、中层西风槽及无辐散引导气流和高层南亚高压辐散气流紧密相关,为此,我们做针对性分析。梅雨期间,增加风场谱逼近方案后模式在绝大多数情况下均能明显改善三个特征层形势场,SNUV 试验较 CTL 有较低的 RMSE(表 4)和较高的 CC(表略),在温压湿风各要素的量值和空间分布上更加趋近于分析场。三个特征层的各要素改进作用明显(图 6),各时效五要素平均而言,850、500、200 hPa 的 RMSE(CC)分别降低了(增加了)24.1%(13.6%)、22.7%(21.7%)和 13.0%(12.2%)。这些形势场的修正对梅雨系统位置、强度和移速的改进有重要

促进作用,下文典型个例预报性能评估分析中将做进一步展示。

同时,各要素的改进效果基本上随着预报时效的增加而增大(图 4,图 6)。以 500 hPa 特征层为例

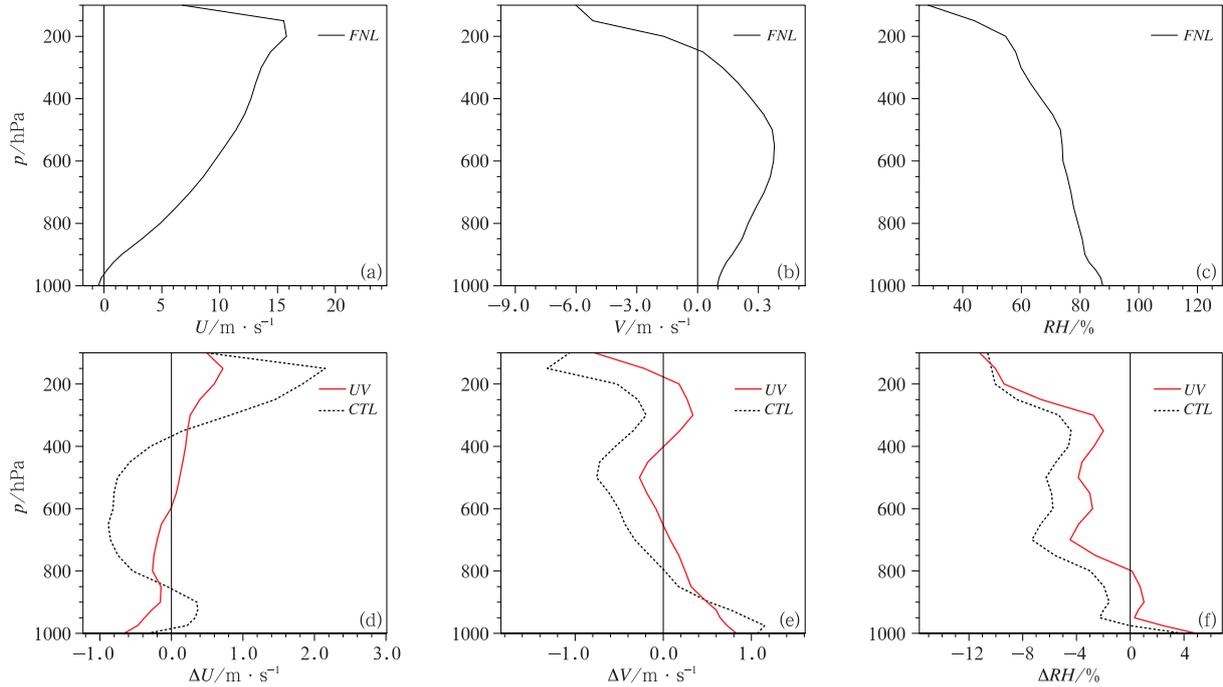


图 5 FNL 再分析资料(a)纬向风、(b)经向风和(c)相对湿度区域平均垂直廓线及(d,e,f)其与最优谱逼近试验和控制试验模拟的各要素差异(试验模拟减去再分析资料)  
Fig. 5 Area-mean profiles in meteorological elements of (a) zonal wind, (b) meridional wind, and (c) relative humidity from FNL data and (d, e, f) deviations between simulations and FNL data (the former minus the latter) for CTL and SNUV experiments

表 4 控制试验和最优试验预报形势场的 RMSE

Table 4 RMSEs of simulated weather situation for CTL and SNUV experiments

D02	层次/hPa	提前量/h	试验名称	气象要素				
				$U/m \cdot s^{-1}$	$V/m \cdot s^{-1}$	$H/gpm$	$T/K$	$RH/\%$
RMSE	850	24	CTL	3.01	2.47	6.99	0.90	11.64
			SNUV	<b>2.32</b>	<b>2.07</b>	<b>6.32</b>	<b>0.70</b>	<b>9.83</b>
		48	CTL	3.40	2.87	8.13	1.02	13.15
			SNUV	<b>2.41</b>	<b>2.05</b>	<b>6.63</b>	<b>0.76</b>	<b>10.36</b>
		72	CTL	3.68	3.12	8.92	1.17	15.13
			SNUV	<b>2.46</b>	<b>2.14</b>	<b>6.87</b>	<b>0.79</b>	<b>10.38</b>
	500	24	CTL	2.62	2.62	6.17	0.56	16.72
			SNUV	<b>2.09</b>	<b>2.15</b>	<b>5.53</b>	<b>0.53</b>	<b>13.14</b>
		48	CTL	3.28	2.88	7.54	0.64	20.77
			SNUV	<b>2.24</b>	<b>2.21</b>	<b>5.66</b>	<b>0.54</b>	<b>13.98</b>
		72	CTL	3.38	2.93	7.74	0.67	21.87
			SNUV	<b>2.22</b>	<b>2.22</b>	<b>5.77</b>	<b>0.55</b>	<b>14.71</b>
200	24	CTL	3.46	3.82	6.32	0.51	14.66	
		SNUV	<b>2.62</b>	<b>2.99</b>	<b>6.61</b>	<b>0.52</b>	<b>14.25</b>	
	48	CTL	3.93	4.03	6.62	0.54	15.46	
		SNUV	<b>2.62</b>	<b>3.05</b>	<b>6.89</b>	<b>0.52</b>	<b>14.32</b>	
	72	CTL	4.17	4.16	7.24	0.56	15.69	
		SNUV	<b>2.54</b>	<b>3.00</b>	<b>6.99</b>	<b>0.50</b>	<b>14.46</b>	

注:粗体部分示意最佳方案。

Note: Bold number denotes the best scheme.

(图 6c,6d),通过风场谱逼近将 CTL 试验 24、48 和 72 h 的纬向风(经向风) RMSE 改进率从 20.0% (18.1%) 增至 31.9% (23.4%) 后再增至 34.2% (24.2%), 对应的空间 CC 提升率从 15.9% (16.3%) 升至 35.3% (35.0%) 后再升至 42.1% (35.1%)。湿度场 24、48 和 72 h 的提升率依次为 21.4%、32.7% 和 32.8%, 对应的空间 CC 改进率分别是 14.4%、33.3% 和 39.5%。温度要素以及降水预报结果也存在类似趋势, 这可能与区域数值模式预报的较长波长信号失真随着积分时间的增加而加大有关, 也说明了在短期天气模式中使用谱逼近方法是必要的, 该方法可以一定程度减缓中尺度数值

预报性能随预报时效的递减幅度, 有效延长产品的可预报时效。

### 2.3 最优方案对典型个例的影响

图 7 给出了 2015 年 6 月 8 日 00 时至 9 日 00 时的梅雨大暴雨过程 24 h 累计雨量实况和模拟。对比可见: 经过谱逼近试验将 CTL 中雨带的整体位置往北做了修正, 其中位于浙西衢州的大暴雨雨量中心也更加接近实况。统计得到, CTL 和 SNUV 试验与实况的 CC (RMSE) 分别为 0.24 mm (36.8 mm) 和 0.69 mm (23.3 mm), 通过谱逼近提升了 187.5% (36.7%)。暴雨以上的 TS 评分也从

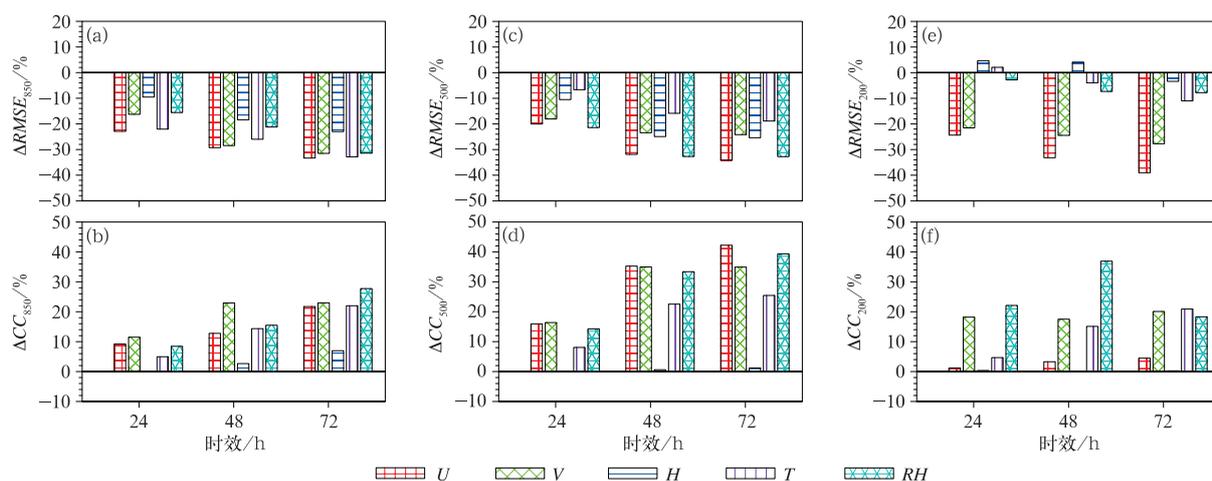


图 6 850 hPa(a,b), 500 hPa(c,d) 和 200 hPa(e,f) 层次最优试验相对控制试验各要素模拟(a,c,e) RMSE 和(b,d,f) CC 的区域平均差异百分比随预报时效的变化 (最优试验减去控制试验后除以控制试验)

Fig. 6 Mean difference percentage evolution with lead time in statistics of (a, c, e) RMSE and (b, d, f) CC meteorological elements between SNUV experiment and control run (the former minus the latter and then divide the latter) at 850 hPa (a, b), 500 hPa (c, d) and 200 hPa (e, f)

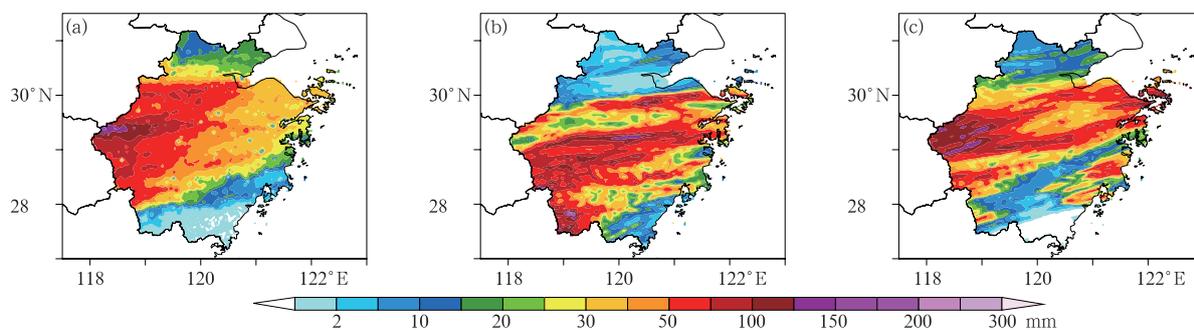


图 7 2015 年 6 月 9 日 00 时 24 h 累计降水的(a)实况、(b)控制试验和(c)最优谱逼近试验  
Fig. 7 Comparison of 24 h accumulated precipitation from (a) observation, (b) CTL and (c) SNUV experiments at 0000 UTC 9 June 2015

0.28 提高至 0.40, 改进了 42.9%。

分析逐 12 h 的 850 hPa 风场演变显示(图 8), 风场谱逼近后低层切变的位置和移速发生了变化, 原来 CTL 试验中切变线偏南和南下移动速度偏快

的现象都得到了一定程度的修正, 两个试验相对 FNL 再分析资料的差异(图 8b, 8c 中阴影所示)定量显示出了 SNUV 试验对于风场的模拟更加接近实况。与此同时, 相对湿度场变化也表明(图 9),

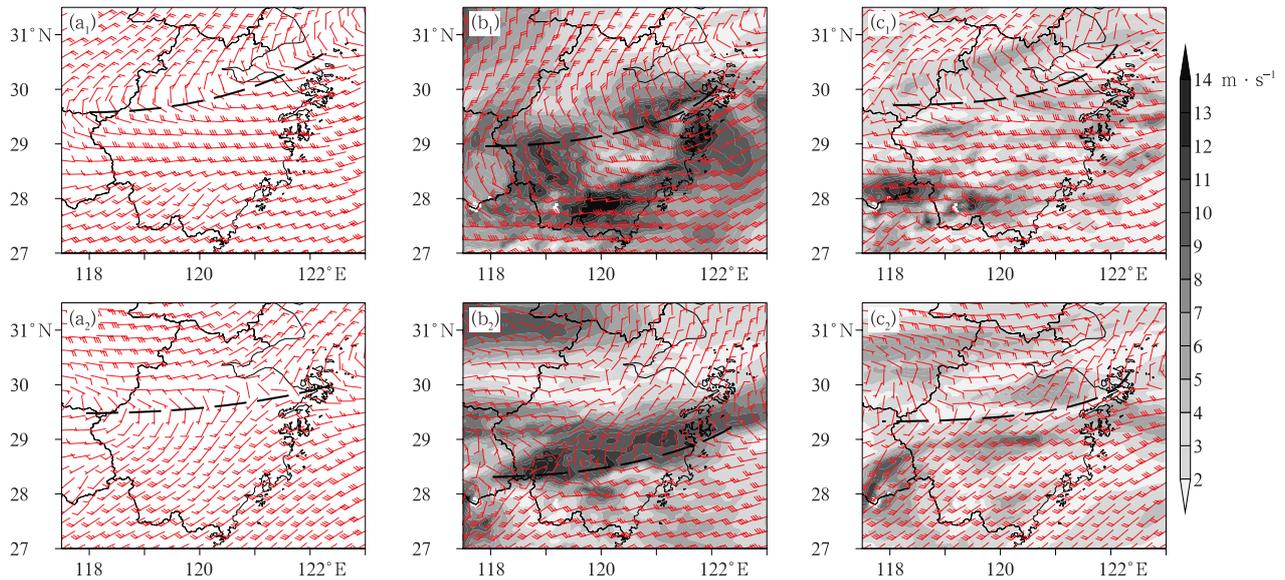


图 8 2015 年 6 月 8 日 12 时(a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>)和 9 日 00 时(a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>)850 hPa 风场(风向杆, 单位: m · s<sup>-1</sup>)

逐 12 h 演变对比(a)FNL 再分析, (b)控制试验, (c)最优谱逼近试验

(粗黑虚线示意切变线, 阴影为模拟减去 FNL 再分析资料差值风场的全风速)

Fig. 8 The 12 h evolution of 850 hPa wind field (barb, unit: m · s<sup>-1</sup>) from (a) FNL, (b) CTL experiment, (c) SNUV experiment at (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>) 1200 UTC 8 and (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>) 0000 UTC 9 June 2015

(The bold black line denotes wind shear line, shaded areas indicate the speed of wind deviation between the simulation and FNL data)

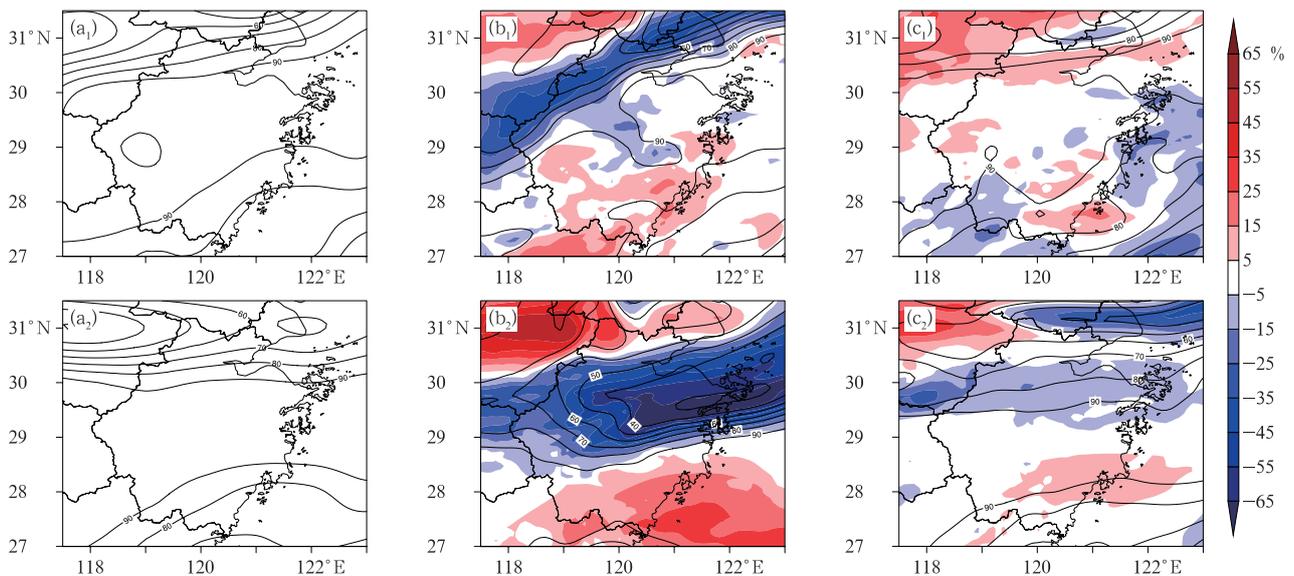


图 9 同图 8, 但为相对湿度(等值线)

(阴影为模拟减去 FNL 再分析资料差值湿度场)

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for relative humidity (isoline)

(Shaded areas indicate the relative humidity deviation between the simulation and FNL data)

SNUV 试验基本消除了原来 CTL 试验浙中北地区-25%以上的湿度负偏差,使得模拟大气的偏干现象得到明显改善,改进了高湿区( $\geq 80\%$ )偏南且南移过快现象,较好实现了大尺度形势场向分析场的订正。由天气学原理可知,低层切变线及其辐合形成的高湿区和梅雨形成紧密相关,风场谱逼近调整在直接修正了动力场的基础上,通过数值模式中物理过程协同和积分最终不同程度修正了其他热力场要素,较明显改进了湿度场的强度和分布,从而最终实现了对于梅雨降水模拟的较好订正。

### 3 结论和讨论

针对目前浙江区域数值预报模式中存在的雨带模拟偏差问题,本文利用谱逼近方法和 WRF 模式开展了单要素和多要素组合动力逼近敏感性数值试验,探讨了不同要素及其组合谱逼近方法对 2015 年典型梅雨天气预报性能的影响。初步获得以下认识:

(1) 单要素谱逼近敏感性试验表明,不同要素逼近对于梅雨模拟效果影响差异显著,风场逼近对于模拟结果改进显著,高度场逼近对于结果略有改善,而温度场逼近主要表现为负效应。整体平均而言,风场逼近试验方案表现最优, RMSE、CC、TS、ETS、HSS 各项评估参数全面优于控制试验,对上述各参数的改进率分别为 12.0%、28.5%、18.6%、44.4%和 41.2%。高度场逼近的改进率则多低于 3%。温度场逼近体现为负贡献,在-17%~-8%。

(2) 多要素谱逼近敏感性试验得到,在风场要素基础上组合了其他要素逼近对降水效果影响的差异性与单要素大致类似。组合了温度场后降水改进幅度较单纯风场逼近方案明显下降,组合了高度场后对降水改进幅度影响很小。总体上,最优多要素组合逼近方案为风场与高度场的组合试验, RMSE、CC、TS、ETS、HSS 各参数的改善率分别为 12.0%、26.4%、17.0%、41.2%和 37.8%。结合单要素最优方案,考虑今后业务运行的效率等,文中最终将单纯水平风场谱逼近方案确定为最优方案。

(3) 最优方案风场谱逼近对梅雨期间形势场不同要素的影响程度不同,总体上影响由大到小的排序为纬向风、经向风、相对湿度、温度场和高度场;各要素改进幅度随预报时效的延长呈增加趋势,这主要与区域模式内部的较大尺度系统误差随时间积分

的增长有关;同时,不同要素改进程度在垂直方向存在明显差异,梅雨期间三个特征层的要素改进明显, 850、500、200 hPa 的 RMSE(CC) 平均分别降低了(增加了) 24.1% (13.6%)、22.7% (21.7%) 和 13.0% (12.2%)。

(4) 典型个例分析进一步展示了水平风场谱逼近在较好订正了低层风场及切变线动力条件的基础上,通过数值模式中物理过程协同积分最终不同程度修正了高湿区等关键热力因子,从而改进了高分辨率区域模式的梅雨模拟。

本研究将谱逼近方法应用到梅雨天气过程的模拟中,能一定程度上改进区域中尺度数值模式中雨带偏差及降水预报性能随预报时效下降较快的不足,也进一步验证了谱逼近方法在短期天气高分辨率区域数值预报技术中的实际应用价值(Cha et al, 2011;王淑莉等,2016)。同时,为便于谱逼近方案的设计、调试和突出方法本身性能的探讨,本文选用的强迫场是具有较高可信度的 FNL 再分析资料,而实际预报中实时获取的强迫场可能是全球模式预报资料,在资料的准确性上和谱逼近方案的效果上可能会有一定程度的降低,这方面的探讨将另文开展。另外,本文谱逼近方案所有试验中统一采用了 WRF 模式推荐的谱逼近强度系数,该系数主要是基于风场逼近而调试的,这可能是影响到温度场和高度场逼近效果的一个重要因素;考虑了湿度场要素逼近的新方案在实际应用是否对于降水的改进更为有效(Spero et al, 2014),关于不同逼近强度系数和不同资料驱动下谱逼近方法对高分辨数值天气预报模式性能的影响有待今后研究继续开展。诚然,正如 von Storch et al(2000)指出,谱逼近技术是一种“间接同化技术”;在某种程度上说,是基于当前现状而采取的一个“权宜之计”,有限区域模式造成大尺度波长识别误差问题的根本性解决还需从造成模式误差的物理或数学计算因素来进一步入手。

### 参考文献

- 陈葆德,王晓峰,李泓,等,2013. 快速更新同化预报的关键技术综述[J]. 气象科技进展, 3(2): 29-35. Chen B D, Wang X F, Li H, et al, 2013. An overview of the key techniques in rapid refresh assimilation and forecast[J]. Adv Meteor Sci Technol, 3(2): 29-35 (in Chinese).
- 陈锋,董美莹,冀春晓,等,2012. WRF 模式对浙江 2011 年夏季降水和温度预报评估及其湿过程敏感性分析[J]. 浙江气象, 33(3): 3-12. Chen F, Dong M Y, Ji C X, et al, 2012. Evaluation of the precipitation and temperature prediction in summer over Zhe-

- jiang Province and sensitivity analysis to moist physics process in the WRF model[J]. Zhejiang Meteor, 33(3): 3-12 (in Chinese).
- 丁金才, 1995. 天气预报评分方法评述[J]. 南京气象学院学报, 18(1): 143-150. Ding J C, 1995. Comment on evaluation methods of weather prediction[J]. J Nanjing Insititute Meteor, 18(1): 143-150(in Chinese).
- 段旭, 王曼, 陈新梅, 等, 2011. 中尺度 WRF 数值模式系统本地化业务试验[J]. 气象, 37(1): 39-47. Duan X, Wang M, Chen X M, et al, 2011. Localization of operational experiment on the WRF mesoscale numerical modeling system[J]. Meteor Mon, 37(1): 39-47(in Chinese).
- 范水勇, 郭永润, 陈敏, 等, 2008. 高分辨率 WRF 三维变分同化在北京地区降水预报中的应用[J]. 高原气象, 27(6): 1181-1188. Fan S Y, Guo Y R, Chen M, et al, 2008. Application of WRF 3DVar to a high resolution model over Beijing Area[J]. Plateau Meteor, 27(6): 1181-1188(in Chinese).
- 李泽椿, 毕宝贵, 金荣花, 等, 2014. 近 10 年中国现代天气预报的发展与应用[J]. 气象学报, 72(6): 1069-1078. Li Z C, Bi B G, Jin R H, et al, 2014. The development and application of the modern weather forecast in China for the recent 10 years[J]. Acta Meteor Sin, 72(6): 1069-1078(in Chinese).
- 邱金晶, 陈锋, 董美莹, 等, 2015. 浙江省快速更新同化系统的建立与检验评估[J]. 气象科技进展, 5(6): 6-12. Qiu J J, Chen F, Dong M Y, et al, 2015. Establishment and evaluation of Zhejiang WRF-ADAS Rapid Refresh System[J]. Adv Meteor Sci Technol [J], 5(6): 6-12(in Chinese).
- 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 S, Tang J P, 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 Sin, 69(2): 297-309 (in Chinese).
- 王佳, 梅钦, 陈钰文, 2017. WRF 模式不同微物理方案水凝物的预报能力检验与集成试验[J]. 气象, 43(5): 552-559. Wang J, Mei Q, Chen Y W, 2017. Performance verification and ensemble experiments of hydrometeors forecasting by different microphysical schemes in WRF model[J]. Meteor Mon, 43(5): 552-559 (in Chinese).
- 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 S L, Xu X D, Kang H W, et al, 2016. 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]. Chin J Atmos Sci, 40(3): 476-488(in Chinese).
- 姚爽, 陈敏, 王建捷, 2015. L 波段分钟数据在 WRF 模式中的变分同化应用试验[J]. 气象, 41(6): 695-706. Yao S, Chen M, Wang J J, 2015. Variational assimilation experiment of L band minute level sounding data with WRF model[J]. Meteor Mon, 41(6): 695-706(in Chinese).
- 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 X F, Zhou T J, 2012. Impact of the spectral nudging on the simulation of a regional climate model: different weight function[J]. Acta Meteor Sin, 70(5): 1084-1097(in Chinese).
- 章国材, 2004. 美国 WRF 模式的进展和应用前景[J]. 气象, 30(12): 27-31. Zhang G C, 2004. Progress of weather research and forecast (WRF) model and application in the United States[J]. Meteor Mon, 30(12): 27-31(in Chinese).
- 郑永骏, 金之雁, 陈德辉, 2008. 半隐式半拉格朗日动力框架的动能谱分析[J]. 气象学报, 66(2): 143-157. Zheng Y J, Jin Z Y, Chen D H, 2008. Kinetic energy spectrum analysis in a semi-implicit semi-Lagrangian dynamical framework[J]. Acta Meteor Sin, 66(2): 143-157(in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2000. 天气学原理和方法: 第 3 版[M]. 北京: 气象出版社. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2000. The theory and Methodology of Synoptic Meteorology (Version 3) [M]. Beijing, China Meteorological Press(in Chinese).
- Aggarwal R, Kumar R, 2013. A comprehensive review of numerical weather prediction models[J]. Int J Comput Appl, 74(18): 44-48.
- Benjamin S G, Jamison B D, Moninger W R, et al, 2010. Relative short-range forecast impact from aircraft, profiler, radiosonde, VAD, GPS-PW, METAR, and Mesonet observations via the RUC hourly assimilation cycle[J]. Mon Wea Rev, 138(4): 1319-1343.
- Benjamin S G, Smirnova T G, Brundage K, et al, 2004. A 13-km RUC and beyond: recent developments and future plans[C] // Proceedings of Joint Session with 22nd Conference on Severe Local Storms and 11th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. Hyannis: AMS.
- Cavallo S M, Torn R D, Snyder C, et al, 2013. Evaluation of the advanced hurricane WRF data assimilation system for the 2009 Atlantic hurricane season[J]. Mon Wea Rev, 141(2): 523-541.
- 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): D14108.
- 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): D10103.
- Cha D H, Wang Y Q, 2013. A dynamical initialization scheme for real-time forecasts of tropical cyclones using the WRF model[J]. Mon Wea Rev, 141(3): 964-986.
- Chen F, Dudhia J, 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity[J]. Mon Wea Rev, 129(4): 569-585.
- Choi S J, Lee D K, 2016. Impact of spectral nudging on the downscaling of tropical cyclones in regional climate simulations[J]. Adv Atmos Sci, 33(6): 730-742.
- 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.
- Done J, Davis C A, Weisman M, 2004. The next generation of NWP: explicit forecasts of convection using the weather research and forecasting (WRF) model[J]. *Atmos Sci Lett*, 5(6):110-117.
- Gotway J H, Holland L, Brown B, et al, 2009. Model evaluation tools version 2.0 (METv2.0) user's guide[R]. Boulder: Developmental Testbed Center.
- Hong S Y, Chang E C, 2012. Spectral nudging sensitivity experiments in a regional climate model[J]. *Asia-Pac J Atmos Sci*, 48(4):345-355.
- Hong S Y, Dudhia J, Chen S H, 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation[J]. *Mon Wea Rev*, 132(1):103-120.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J, 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. *Mon Wea Rev*, 134(9):2318-2341.
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al, 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models[J]. *J Geophys Res*, 113(D13):D13103. DOI:10.1029/2008JD009944.
- Lee D K, Eom D Y, Kim J W, et al, 2010. High-resolution summer rainfall prediction in the JHWC real-time WRF system[J]. *Asia-Pac J Atmos Sci*, 46(3):341-353.
- Michalakes J, Chen S, Dudhia J, et al, 2001. Development of a next-generation regional weather research and forecast model[C]// *Developments in Teracomputing: Proceedings of the 9th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*. Reading: World Scientific Publishing:269-276.
- Miguez-Macho G, Stenchikov G L, Robock A, 2004. Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate model simulations[J]. *J Geophys Res*, 109(D13):D13104.
- Miguez-Macho G, Stenchikov G L, Robock A, 2005. Regional climate simulations over North America: interaction of local processes with improved large-scale flow[J]. *J Climate*, 18(8):1227-1246.
- Powers J G, Klemp J B, Skamarock W C, et al, 2017. The weather research and forecasting model: overview, system efforts, and future directions[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(8):1717-1737.
- Shan H X, Guan Y P, Huang J P, 2012. Effects of spectral nudging on the 2010 East Asia summer monsoon using WRF mode[J]. *Chin J Oceanol Limnol*, 30(6):1105-1115.
- Skamarock W C, 2004. Evaluating mesoscale NWP models using kinetic energy spectra[J]. *Mon Wea Rev*, 132(12):3019-3032.
- Skamarock, W C, Klemp J B, Dudhia J, et al, 2008. A description of the advanced research WRF version 3[R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, Boulder: National Center for Atmosphere Research.
- Spero T L, Otte M J, Bowden J H, et al, 2014. Improving the representation of clouds, radiation, and precipitation using spectral nudging in the Weather Research and Forecasting model[J]. *J Geophys Res*, 119(20):11682-11694.
- Tang J P, Song S, Wu J, 2010. Impacts of the spectral nudging technique on simulation of the East Asian summer monsoon[J]. *Theor Appl Climatol*, 101(1-2):41-51. DOI:10.1007/s00704-009-0202-1.
- von Storch H, Langenberg H, Feser F, 2000. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes[J]. *Mon Wea Rev*, 128(10):3664-3673.
- 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.