1	CMA-MESO 3km 系统 2m 温度预报诊断 [*]
2	蔡怡 ^{1,2)} 徐枝芳 ^{2,3)} 朱克云 ¹⁾ 李泽椿 ²⁾
3	1) (成都信息工程大学,成都 610225)
4	2) (国家气象中心,北京 100081)
5	³⁾ (中国气象局地球系统数值预报中心,北京 100081) 摘要: 诊断分析 CMA-MESO (China Meteorological
6	Administration Mesoscale model)(原 GRAPES) 3km 系统冬季 2m 温度预报效果,为冬奥气象保障服务
7	以及 CMA-MESO 模式系统开发优化改进提供参考,选取 2020 年 12 月-2021 年 2 月 2m 温度预报发现,每日低
8	温预报较好,高温预报较差,00:00-06:00时(世界时,下同)升温过程预报效果好于 06:00-21:00时降
9	温过程。滑动双权重平均法订正显示, 2m 温度预报偏差以系统性偏差为主,订正前均方根误差和标准差较
10	大地区改善效果更为明显。依据温度订正前后标准差差异选择华北、华东、西南3个区域的个例和华北地
11	区连续试验进行波谱分析发现,功率谱随着尺度增大逐渐增多,2m 温度预报偏差和 2m 温度不同尺度功率
12	谱信息存在一定的对应关系,当不同尺度上的功率谱存在缺失或异常大值时,2m温度预报与实况存在明显
13	差异。
14	关键词: CMA-MESO; 2m 温度; 偏差订正; 波谱分析
15	
16	Diagnosis of 2m Temperature Prediction by CMA-MESO System
17	with 3km Resolution
18	Cai Yi ^{1,2)} Xu Zhi fang ^{2,3)} Zhu Ke yun ¹⁾ Li Ze chun ²⁾
19	¹⁾ (Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)
20	²⁾ (National Meteorological Center, Beijing 100081)
21	³⁾ (Center for Earth System Modeling and Prediction of CMA, Beijing 100081) Abstract: It is important to diagnose
22	and analysis 2m temperature prediction by CMA-MESO system with 3km resolution in winter
23	for the Winter Olympics meteorological service and CMA-MESO model system development.
24	The 2m temperature prediction data from December 2020 to February 2021 are selected and

* 资助课题:国家重点研发计划 2018YFF0300103 和 2018YFC1507600.
 作者:蔡怡,主要从事数值模式与资料同化研究.E-mail: 281331328@qq.com
 通讯作者:徐枝芳,主要从事数值模式与资料同化研究.E-mail: zhifang@cma.gov.cn

25 diagnosed. The results show that the daily low temperature prediction is better, while the high 26 temperature prediction is poor, and the prediction effect of the model on the heating process at 27 00-06 UTC is better than that of the cooling process at 06-21 UTC. When the 2m temperature 28 prediction is corrected by the moving-biweight average method, the correction results show that 29 the 2m temperature prediction deviation is mainly systematic deviation, the RMSE and standard 30 deviation are reduced, especially in areas with large deviations before correction. According to 31 the large difference of standard deviation before and after temperature correction, three regions 32 of North China, East China and southwest are selected to analyze the individual cases of three 33 regions with obvious difference in 2m temperature prediction (North China, East China and 34 southwest) and the continuous test in North China. It is found that the power spectrum energy gradually increases with the scale. There is a certain correspondence between the 2m 35 36 temperature prediction deviation and the power spectrum information of different scales. When 37 value of power spectrum energy is very small or abnormally large, the difference between 2m 38 temperature prediction and observation is significant.

39 Key words: CMA-MESO; 2m temperature; deviation correction; spectrum analysis

- 40
- 41 引 言

随着数值模式的不断发展和高性能计算机能力的提升,高分辨率的区域快速更新循环同 42 化系统发展迅速, 以满足中人尺度灾害性天气预报需求。快速更新循环同化系统充分利用时 43 空高频的观测资料来提高模式初始场质量,在短临预报上发挥重要作用。美国在1991年开始 44 了快速更新同化预报技术的研究开发,并于 1994 年开始在 NCEP (National Centers for 45 Environmental Prediction)业务运行(RUC, Rapid Update Cycle)(Benjamin et al, 2004), 46 47 之后经过几次更新和升级,于 2005 年开始采用 3 维变分 (3DVAR, Variation Data 48 Assimilation System) 技术 (Benjamin et al, 2006), 2012 年建立了基于混合变分集合同 化的快速更新系统 (RAP, Rapid Refresh), 2014 年发展了高分辨率的 3km 快速更新系统 49 50 (HRRR, High Resolution Rapid Refresh) (Benjamin et al, 2016)。2000 年后国内气象 业务部门陆续引进和发展适合本地区的 RUC 系统,尽管起步较晚,但发展却十分迅速(陈德 51 52 辉等,2008;薛纪善等,2008)。2007年北京快速更新数值模式系统(BJ-RUC, Beijing-Rapid Update Cycle)开始业务试运行,并成功应用于北京 2008 年奥运会和国庆 60 周年等大型活 53

动的气象保障服务中,是北京气象台强对流天气短时临近预报的重要技术支撑系统(范水勇 54 等,2008)。2009 年上海建立了基于 ADAS (ARPS Data Assimilation System) 同化系统和中 55 56 尺度数值模式 WRF(Weather Research and Forecasting Model)的快速更新同化预报系统 57 (SMB-WARR, Shanghai Meteorological Bureau-WRF ADAS Rapid Refresh System), 成功 应用于 2010 年上海世博会气象服务保障 (傅娜等, 2013)。广州基于 CMA-MESO 及三维变分同 58 59 化发展了快速更新同化预报系统 CMA-GD (陈子通等, 2010)。2009 年武汉快速更新同化预报 60 系统 AREM-RUC(Advanced Regional Eta-coordinate Model-Rapid Update Cycle)投入业 61 务应用(王叶红等,2011)。

2010年,中国气象局国家气象中心基于 CMA-GD 系统,采用模式面三维变分同化系统(Ma 62 et al, 2009)和 CMA-MESO 模式 V3.0版本建立全国区域 15km 分辨率 31 层 3h 循环的 CMA-MESO 63 进入准业务运行(徐枝芳等, 2013), 2014 年 CMA-MESO 水平分辨率升级到 10km, 垂直分层 64 50 层。随后, CMA-MESO 不断升级改进提升要素场和降水预报(黄丽萍等, 2017), 2015 年建 65 立了覆盖中国东部区域 3km 水平分辨率的试验系统(许晨璐等, 2017)。2020 年, CMA-MESO 66 系统分辨率从10km升级为3km(庄照荣等,2020),资料同化种类和资料量大幅增加,CMA-MESO 67 系统在短临预报中发挥着越来越重要的作用。但面临的挑战也与日俱增,高分辨率的数值天 68 气预报应用于短临预报面临更多的挑战,如对流尺度的资料同化,物理过程构建等等,预报 69 存在不可避免的误差。为了提高预报准确度,一方面可以通过加强资料同化技术改善初始场, 70 优化模式物理过程参数化方案,改善模式对各类天气捕捉的精准度(王学忠等,2003;托亚 71 等,2003;盛春岩等,2006;薛谌彬等/2017);另一方面可以利用误差订正来改善数值预 72 报产品的应用效果《王敏等, 2012; 王丹等, 2016; 李佰平和智协飞, 2012; 赵滨和张博, 73 2018)。国内学者在模式误差订正方面做了很多工作:如马旭林等(2015)在卡尔曼滤波递 74 减平均的一阶矩和二阶矩偏差订正方案基础上发展综合偏差订正方案,有效减小集合平均偏 75 差; 王婧等(2015)采用平均法、双权重平均法、滑动平均法和滑动双权重平均法对 2014 76 年夏季 CMA-MESO 15km 系统 2m 温度预报产品进行偏差订正,滑动双权重平均法订正取得了 77 较好效果:薛谌彬等(2019)提出了结合滑动双权重平均订正法和空间误差逐步订正法的综 78 合订正技术,并将该法成功运用于江西省精细化气象要素客观预报业务系统; 唐文苑和郑永 79 80 光(2019)基于 CMA-MESO 15km 系统 2017 年夏季逐小时降水预报,对时间滞后集合成员采 81 用频率匹配订正法进行降水量级订正,提高了对强降水系统位置、形态及降水量级的预报水 平: 张玉涛等(2020)采用一阶自适应的卡尔曼滤波方法对 CMA-MESO 3km 模式的 2m 温度、 82

83 2m 相对湿度和 10m 风开展偏差订正,有效提高了这些产品在 2018 年平昌冬奥会气象服务中84 的预报能力。

2022 年冬奥会比赛项目将在我国开展,3km CMA-MESO 系统将为赛事提供气象保障服务, 85 因此开展 3km CMA-MESO 系统 2m 温度预报诊断分析是很有必要的。本文通过对 2020 年 12 86 月-2021 年 2 月 CMA-MESO 系统每天 8 个起报时间每 3h 的 2m 温度预报产品进行诊断。我国 87 国土辽阔,地形复杂,地面 2m 温度具有一定局地性。为了更好的分析 CMA-MESO 系统 2m 温 88 度预报的问题,依据订正前后标准差对比,本文对 2m 温度预报效果存在明显差异的华北、 89 华东、西南开展波谱分析,通过波谱分析来诊断模式系统不同尺度信息的捕捉能力与预报准 90 确性的关系。庄照荣等(2018, 2020)采用二维离散余弦转换(2D-DCT, Discrete Cosine 91 Transform),将全球 T639 模式和区域 CMA-MESO 模式分析增量进行谱分解,获得全球和区域 92 模式产品中的不同尺度信息。二维离散余弦转换能较好分解模式预报的尺度信息、本文将采 93 用该方法进行波谱分析。 94

95

96 1 资料和方法

97 1.1 资料

选用 2020 年 12 月-2021 年 2 月 CMA-MESO 系统每日 00 时、03 时、06 时、09 时、12 时、 98 15 时、18 时、21 时 8 个起报时间,每 3h 一次 2m 温度预报输出产品和全国地面观测 2m 温 99 度资料。由于 12 月 1 日 21 时起报的 24h 预报产品对应观测时间为 12 月 2 日 21:00 时,为 100 保证诊断分析时每个时刻的预报产品样本量一致,因此从每月3日开始诊断分析。CMA-MESO 101 102 同化观测资料包括探空、地面报、船舶报、飞机报、云导风、雷达速度方位显示(VAD, Velocity Azimuth Display)反演风场和 GPS(Global Positioning System) 掩星反演可降水量(GPS/PW, 103 Precipitable Water Vapor), 云分析使用了风云 2G 的亮温和云总量, 以及雷达反射率资料。 104 模式试验的水平分辨率为 0.03°×0.03°, 预报范围为 (70°E-145°E, 15°N-65°N), 105 106 覆盖了整个中国区域。由于观测站 2m 温度存在少量缺失,对缺测率大于 5%的观测站点进行 了剔除,采用双线性插值法将 2m 温度预报产品插值到观测站点,在站点进行诊断分析。 107

108 CMA-MESO 系统每天 00 时(世界时,下同)和 12 时冷启动一次,每隔 3 小时一次资料
109 同化和预报,冷启动预报时效为 36 小时,暖启动预报时效为 30 小时,一天 8 次提供快速更
110 新中尺度数值预报的预报产品,为了保证诊断分析数据样本一致性,本文仅对前 24h 预报产
111 品做诊断分析。

112 1.2 诊断方法

113 (1) 平均法 (Mean): 根据不同站点的观测增量 $Mean_k^{obs-b}$ 分别对其预报进行订正。

$$Mean_k^{obs-b} = \sum_n T_{k,n}^{obs} - T_{k,n}^b$$
(1)

114

115

$$T_{k,n}^{b,cal} = T_{k,n}^{b} + Mean_{k}^{obs-b}$$
⁽²⁾

116 其中 *T_{k,n}^{obs}*为 2m 温度观测值, *T^b_{k,n}*为插值到站点的 2m 温度预报值, *T^{b,cal}_{k,n}*为订正后的 2m
 117 温度预报值, k 为站点序号, n 为观测时次。

120
$$w_{k,n}^{obs-b} = \frac{\left(T_{k,n}^{obs} - T_{k,n}^{b}\right) - M_{k}^{obs-b}}{7.5 \times MAD_{k}^{obs-b}}$$
(3)

$$BMean_{k}^{obs-b} = M_{k}^{obs-b} + \frac{\sum_{n} [(T_{k,n}^{obs} - T_{k,n}^{b}) - M_{k}^{obs-b}][1 - (w_{k,n}^{obs-b})^{2}]^{2}}{\sum_{n} [1 - (w_{k,n}^{obs-b})^{2}]^{2}}$$
(4)

122

$$T_{k,n}^{b,cal} = T_{k,n}^b + BMean_k^{obs-b}$$
⁽⁵⁾

123 其中*BMean^{obs-b}*为第 k 个站点观测增量的双权重平均,
$$M_k^{obs-b}$$
为第 k 个站点观测增量

124 的中位数,
$$MAD_k^{obs-b}$$
为对应的绝对离差中位数(即 $[(T_{k,n}^{obs} - T_{k,n}^{b}) - M_k^{obs-b}]$ 的中位数)。
125 $w_{k,n}^{obs-b}$ 是权重, 当 $w_{k,n}^{obs-b} > 1$ 时, 取 $w_{k,n}^{obs-b} = 1$ 。

(3) 滑动双权重法:徐枝芳等(2013)指出 2m 温度具有半日周期、日周期和 15d 周期
的变化特征,因此,本文采用前 15d 的已知 2m 温度预报值和站点实况资料,通过双权重方
法计算出对应时次的订正量,对当前一天 2m 温度预报场进行订正,以此类推,计算出 2021
年全国范围 1 月和华北地区 2 月订正后的预报场。

130 (4)本文选用平均偏差(Bias)、均方根误差(RMSE, Root Mean Squared Error)及
131 标准差(Std, Standard Deviation)进行诊断分析。

132 平均误差:
$$Bias_{k,n} = T_{k,n}^b - T_{k,n}^{obs}$$
 (6)

133 均方根误差:
$$RMSE = \sqrt[2]{\frac{1}{N \times K} \sum_{\substack{n=1 \ k=1}}^{N,K} (T^b_{k,n} - T^{obs}_{k,n})^2}$$
 (7)

标准差:
$$\sigma_k^{Bias} = \sqrt[2]{\frac{\sum_{n=1}^{N} (Bias_{k,n}^b - \overline{Bias_k^b})^2}{N}}$$
(8)

$$\overline{Bias_k^b} = \frac{\sum_{n=1}^{N} Bias_{k,n}^b}{N}$$
(9)

135

$$\sigma_k^{RMSE} = \sqrt[2]{\frac{\sum_{n=1}^N (RMSE_{k,n}^b - \overline{RMSE_k^b})^2}{N}}$$
(10)

136

137

$$\overline{RMSE_k^b} = \frac{\sum_{n=1}^{N} RMSE_{k,n}^b}{N}$$
(11)

其中Biasb和RMSEb分别为各站点同一预报时间不同起报时间预报的偏差和均方根误 138 差平均值, σ_k^{Bias} 为各站点 Bias 的标准差, σ_k^{RMSE} 为各站点 RMSE 的标准差。 139

140

2m 温度特征分析 2 141

2.1 全国区域 2m 温度特征分析 142

将不同起报时间、不同预报时效的预报与实况对比(图1)可以看出, CMA-MESO 系统可 143 以较好的预报出 2m 温度的日变化趋势。2020 年 12 月至 2021 年 2 月总共出现 2 次最高温度 144 低于 0℃的过程: 12 月 28-29 日及 1 月 7-10 日。当出现温度明显大幅降低时,不同起报时 145 间预报偏差变大,最大偏差可达到3℃/2月整体预报与实况的偏差较12月和1月偏大,2021 146 年2月4日至20日,由于 模式参数调整,全国区域不同起报时间预报差异较大。1月预报 147 与实况的偏差较 12 月偏大,每日 06:00 时和 09:00 时预报比实况更低,有时超过 2℃,00:00 148 时预报高于实况,整月温度波动变化幅度相对12月大,不同起报时间预报差异明显。 149

将同一观测时间对应的 8 个起报时间 2m 温度预报分别做月平均后与实况对比(图 2), 150 151 每日最高温度出现在 06:00 时,最低温度出现在 00:00 时,模式对 00:00-06:00 时的升温过 程预报效果好于 06:00-21:00 时的降温过程,每日 00:00 时预报比实况高 1℃左右; 152 153 06:00-15:00 时预报比实况低; 09:00 时预报偏差值最大, 12 月为-2℃左右, 1 月为-3℃左 右,2月为-2℃左右:12月和1月18:00时和21:00时预报与实况较接近,不同起报时间预 154 报与实况的偏差值不超过 0.5℃,2月偏差值稍大,在1℃左右。王婧等(2015)15km 系统 155 夏季 2m 温度结果显示 09:00-12:00 时不同起报时间预报结果相对集中,其它时间预报结果 156

157 相对分散,且分散度远远大于 3km 系统。这可能是统计分析 2m 温度季节差异造成,也可能158 是模式系统及分辨提升带来的影响。



166

变化曲线

Fig.2 Daily variation of observation and 2m temperature prediction in China with different starting time in

168

December 2020(a), January (b) and February 2021(c)

分别计算 12 月、1 月和 2 月 CMA-MESO 系统不同起报时间的逐 3 小时预报与实况的平均 169 误差和均方根误差,发现不同起报时间平均误差和均方根误差分布主要特征基本相似(图 170 略),与总体平均误差和均方根误差分布基本一致(图3)。12月京津冀地区、东三省大部分 171 地区、西北地区、武夷山脉及西藏东部川西高原预报比实况低,青藏高原地区偏低幅度达到 172 -3℃;内蒙古东北部、新疆地区、四川盆地及华南地区预报比实况高,天山附近正偏差超过 173 3℃,华中地区模式预报相对好些,偏差较小,偏差值不超过1℃。1月偏差分布与12月略 174 有不同,从华北至西北至西藏东部川西高原均呈现为模式预报偏低;黑龙江西北部及内蒙古 175 东部、新疆北部及华中大部分地区为正偏差,大部分地区正偏差值在2℃内 两个月平均误 176 差分布类似,负偏差大值地区主要在西藏东部川西高原、云贵高原、江南武夷山脉、华北地 177 区;正偏差大值地区主要在东北、内蒙古东部、新疆地区;南疆地区两个月的偏差符号相反, 178 12 月为正偏差,偏差为 2-3℃,1 月为负偏差,偏差为-1℃左右;1 月长三角地区的负偏差 179 值要小于 12 月。12 月和 1 月均方根误差分布大体相似,中部地区均方根误差较小,12 月在 180 1.5℃以下,1月在2.5℃以下。12月和1月华北西北至川西青藏东部地区及新疆天山山脉 181 与偏差大值区一致。2月偏差和均方 附近地区均方根误差相对较大,部分地区超过了3°C 182 根误差的大值区范围均有所扩 地区偏差值明显变大;华南及西南大部分地区均方根 183 值和均方根误差值均较前两月稍低,这可能是模式参 误差较前两月明显增大; 华北地区偏 184 数调整的影响。 185

186 CMA-MESO 3km系统冬季 2m 温度预报结果与王婧等(2015) CMA-MESO 15km系统夏季 2m
187 温度预报结果对比发现,两个季节平均误差和均方根误差大值地区分布类似,均分布在:新
188 疆大部分地区、西藏东部及川西高原、江南武夷山脉及华北地区。由此可见,这些地区模式
189 系统的 2m 温度预报还存在一些问题,需要改进。



191 图 3 2020 年 12 月 (a, d)、2021 年 1 月 (b, e) 和 2 月 (c, f) 2m 温度预报 Bias (a, b, c) 和 RMSE (d, e,

192

193 Fig.3 The national distribution of bias (a, b, c) and RMSE (d, e, f) for 2m temperature prediction in

194

December 2020(a, d), January (b, e) and February 2021(c. f)

f)的全国分布

195

196 2.2 华北区域 2m 温度特征分析

冬季奥运会将于 2022 年 2 月在北京及周边城市举办,因此选取该区域(以下简称华北 197 地区,112°E-118°E,39°N-45°N)2020年12月-2021年2月CMA-MESO系统每天8个起 198 报时间、同一起报时间 24h 内间隔 3h 的 2m 温度预报产品进行分析。2020 年 12 月与 2021 199 年1月,华北地区 2m 温度变化特征 (见图 4)与全国基本一致,在相同时段出现 2 次最高 200 温度低于 0℃的过程,最高温度和最低温度差异略大于全国区域平均值。华北地区 2021 年 2 201 月 2m 温度明显高于 2020 年 12 月和 2021 年 1 月,每日最高温度在 0℃以上,预报的最高温 202 度和最低温度差异及不同起报时间预报偏差较前两月稍大,2021年2月16日-20日有一次 203 明显的升温过程,最高温度达到 24℃,相较于前两个月出现的降温过程,升温过程的预报 204 与实况间的差异更小一些。将华北地区 8 个起报时间、每 3h 一次预报冬季 2m 温度预报结果 205 做 3 个月的平均 (图 5), 日平均变化趋势与全国基本一致, 每日低温预报较好, 高温预报 206 207 较差,华北地区最高温度与最低温度间的差异比全国区域大,达 10℃左右,不同起报时间 预报差异更大,每日最高温度全国范围不同起报时间预报差异约为0.5℃,而华北地区接近 208 209 1.5℃.



图 5 2020 年 12-2021 年 2 月华北地区 2m 温度实况与不同起报时间预报日变化曲线

218 219 from December 2020 to February 2021

220 3 订正结果分析

由 2020 年 12 月至 2021 年 2 月全国区域 2m 温度预报月变化(图 1)可知, 2 月预报由 221 于参数的调整与 12 月和 1 月表现特征略有差异, 1 月总体温度变化趋势较 12 月波动大, 且 222 1月预报与实况的偏差更大,不同起报时间预报差异也更大,因此全国区域主要针对1月2m 223 温度预报展开订正诊断。采用双权重平均法和滑动双权重平均法对 2021 年1 国区域不 224 月 同起报时间、不同预报时效 2m 温度预报进行订正。订正前(图 6a、66), 225 大部分预报 与实 况有一定的偏差,不同起报时间预报也存在差距,不同观测时间偏差大小也不 226 -致,09:00 时预报偏差最大,有的起报时间预报比实况偏低超过2℃, 差超过2℃;滑动双权 227 均 重平均法订正后结果(图 6c、6d)明显改善,预报与实况的偏差明显减小,偏差值不超过 228 0.5℃,不同起报时间预报差距减到0.1℃内,均方根误差降至 ℃内;1月统计权重系数的 229 双权重平均法订正效果不如滑动双权重平均法,虽预报偏差和均方根误差均明显减少,但预 230 报偏差和均方根误差数值都高于滑动双权重平均法。CMA-MESO系统 2m 温度预报偏差订正后 231 统性偏差。两种订正方法中滑动双权重平均法订正效果 232 明显得到改善,说明大部分偏差为 更好,这可能是滑动双权 系统对不同天气系统 2m 温度预报能力。 233



246 由于全国区域 09:00 时 2m 温度预报偏差和均方根误差最大,下面对全国区域逐日
247 09:00 时预报做进一步分析(图 8)。如图 8 所示,1月 2m 温度预报为先降低后升高再
248 降低直至平稳的趋势,两种订正方法订正后预报均与实况较为接近,滑动双权重法对于
249 降温和升温过程预报的订正更为准确,1月双权重法对波动幅度较小的天气过程预报的
250 订正效果更好。



降至 2.5℃内。双权重平均法(图 9b、9d)订正后,偏差值减小,均方根误差也相对降

262

低,但对华北、西北地区的订正效果不如滑动双权重平均法。





292 00-09 时集中;西南地区订正后 00-09 时起报的预报较订正前更集中;华东地区订正后所有

293 起报时间预报都更集中,预报效果在所选3个区域中最好。





323 24 个地区 1 月最低温(图 11), 15 日不同起报时间预报差异较大。图 13 为不同区域、不同起
325 报时间的偏差和功率谱。由图可见,9 日(图 13a)华北地区预报与实况偏差较大,不同起
326 报时间预报偏差均超过了 3℃,03 和 06 时起报偏差超过了 4℃;西南地区 09-18 时起报预

报比实况低,其它起报时间预报高,09时起报预报偏差最大;华东地区除15时起报预报较 327 实况略微高外其余起报时间预报比实况低,12-21时起报预报效果较好,均在0.2℃以下。 328 15 日(图 13b) 三个区域的模式预报均比实况低,华北地区的偏差最大,09 时起报预报偏 329 差超过了6℃,西南地区除18时和21时起报外,其余起报时间预报均较为准确,偏差均在 330 0.5℃内; 华东地区不同起报时间预报差异较小, 偏差均在 2.5℃上下。所选 3 个区域的 2 331 个个例,华北区域预报效果最差,华北地区在大于 600km 的 α中尺度范围(200-2000km)内 332 功率谱明显较其余两个地区偏大,与预报误差偏大相对应:9日03时和06时及15日09时 333 起报的 2m 温度预报相较于其他起报时间预报,功率谱分布明显不同,15 日 09 时功率谱能 334 量在 300-580km 范围明显较其它起报时间异常偏大,9 日 03 时和 06 时在β中尺度范围 335 (20-200km)内均较其余起报时次小,该起报时间预报相对比其它起报时间预报偏差大。西 336 南地区在9日00-06时大于600km的α中尺度范围内功率谱能量比其它起报时间小,这些起 337 报时间的预报明显为正偏差,09时起报的功率谱能量在大于600km波长范围存在异常大值, 338 对应明显大的负偏差,15日18时和21时在整个α中尺度范围内功率谱较其它起报时次明显 339 偏高,对应这两个起报时间的预报偏差明显较大。华东地区 9 日 00-06 时在大于 400km 的a 340 中尺度范围内功率谱能量比其它起投时间大,12-21时起报功率谱分布较为一致,不同起报 341 342 区域预报差异也不大。 343

上述是针对三个不同区域的单门2m温度功率谱分析,发现不同尺度上能量的差异能够 344 较好地描述出同一观测时间,不同起报时间预报差异。针对华北地区,选取不同起报时间2 345 月每日 09:00 时和 12:00 时预报分别做月平均,对其进行功率谱分析,由图 12 可知 09:00 346 时各起报时间预报偏离实况最大,偏差超过了-2℃,相邻的12:00时各起报时间预报负偏差 347 明显小于 09:00 时,偏差在-1℃内。图 14 为 09:00 时和 12:00 时各起报时间预报对应的月 348 平均功率谱,与单日功率谱类似,月平均功率谱能量同样随着尺度的增大而逐渐增多。从图 349 14 可见,与1月单日功率谱能量相比,2月09:00时预报平均在α中尺度范围功率谱能量较 350 1月15日明显偏低,在β中尺度范围差异不明显,2月平均预报偏差比1月9日略小,但明 351 显小于1月15日的预报偏差。由此可见,2m温度预报偏差的大小和2m温度的不同尺度功 352 率谱信息存在一定的对应关系。对 2 月 09:00 时和 12:00 时两个时间邻近但偏差差异明显的 353

354 预报时间进行对比,发现在大于 200km 的α中尺度范围,09:00 时功率谱能量远高于 12:00 时,
355 尤其是在 1000km 以上的尺度范围,12:00 时预报在 1200 左右,而 09:00 时预报除 12 时起
356 报外其它起报时间预报功率谱值超过 2000,对应的订正前 12 时起报预报偏差较小,这也许
357 就是该起报时间预报订正效果更好的原因之一。

358 由此可见,无论是单日还是月平均功率谱,能量均随着尺度的增大逐渐增多。2m 温度
359 预报偏差和 2m 温度的不同尺度功率谱信息存在一定的对应关系,当 2m 温度预报功率谱信息
360 存在异常时,2m 温度预报就和实况偏差较大,当 2m 温度预报不同尺度上功率谱信息分布相
361 对均匀时,2m 温度预报就和实况比较接近。因此,当模式系统对各种尺度信息进行了准确
362 捕捉时,预报就会更接近实况。随着模式分辨率的提升,局地气象要素的预报更需要关注中
363 小尺度信息的捕捉能力。





872 图14 2月09:00时(a)和12:00时(b)华北区域不同起报时间预报的2m温度预报功率谱随波长变化
 873 Fig. 14 Variation of power spectrum with wavelength of 2m temperature prediction with different starting
 874 time in North China at 09 UTC (a) and 12 UTC (b) on February

376 5 结论与讨论

371

375

377 本文通过对高分辨率 CMA-MESO 系统 2020 年 12 月-2021 年 2 月每天 8 个起报时间每 3h
378 预报的 2m 温度预报产品进行诊断,分析了 2m 温度预报效果以及与不同尺度信息谱能量关系,
379 得到以下几点结论:

380 (1) CMA-MESO 系统对不同地区、不同起报时间的 2m 预报温度表现不一致。新疆西北 部、四川盆地以、华中和华南部分地区模式比实况高,其它地区模式比实况低,华北至西北 381 一带、川西及西藏东部等高海拔地区,比实况偏低超过2℃。每日8个预报时间表现为00:00 382 时预报比实况高,06:00-15-00时预报比实况低,09:00时预报偏差最大,模式对00:00-06:00 383 时的升温过程预报效果好于06.00-21:00时的降温过程。华北区域日变化趋势与全国相似, 384 每日低温预祝较好,而高温预报较差,但其每日最高和最低温度差大于全国区域平均,华北 385 地区 2m 温度 目比12月和1月高,每日最高温度与最低温度间的差异及不同起报时间预报 386 偏差更大。 387

388 (2) CMA-MESO 系统 2m 温度预报存在系统性偏差。双权重平均法和滑动双权重平均法
389 订正后,不同起报时间 2m 温度预报产品误差均有所减小,偏差较大地区订正效果更为明显,
390 如华北至西北一带和西藏东部川西高原。两种方法订正后不同起报时间预报稳定度提高,各
391 起报时间预报偏差减小。相比较而言,滑动双权重法对于降温和升温过程预报订正效果更好,
392 双权重平均法对波动幅度较小的天气过程预报的订正效果较好。

393 (3)功率谱能量随着尺度的增大逐渐增多,2m温度预报偏差的大小和2m温度的不同尺
394 度功率谱信息存在一定的对应关系,当信息缺失或异常大值,则对应2m温度预报与实况存在
395 明显差异;当不同起报时间预报功率谱差异较小时,其预报的偏差也较为一致。华北地区2m
396 温度预报偏差最大,对应大于600km功率谱值比西南和华东两个地区大很多,当某个起报时
397 间预报功率谱分布明显异于其它起报时间时,其预报偏差与其它起报时间也存在明显差异。
398 功率谱不仅能较好地描述单时次不同区域、不同预报成员间的功率谱差异,对于月平均预报
399 同样有效。

400 (4)波谱能量分析与 CMA-MESO 系统不同起报时间 2m 温度预报效果有着很好的对应关
401 系,下一步将借助功率谱分析开展多个预报间的时间滞后集合产品开发,更充分发挥
402 CMA-MESO 系统优势。

403

致谢:感谢郑永骏老师提供的谱分解及功率谱程序,感谢审稿专家和编辑部老师提出的意见和建议。

404

405 参考文献

406 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[J]. 科学通报,53(20):
407 2396-2407. Chen D H, Xue J S, Yang X S, et al, 2008. New generation of multi-scale NWP system (GRAPES): general scientific
408 design[J]. Chin Sci Bull, 53(22): 3433-3445.

409 陈子通,黄燕燕,万齐林,等,2010. 快速更新循环同化预报系统的汛期试验与分析[J]. 热带气象学报,26(1): 49-54. Chen Z T,
 410 Huang Y Y, Wan Q L, et al, 2010. Rapid updating cycle assimilation and forecasting system and its experiments and analysis in flood

- 411 seasons[J]. J Trop Meteor, 26(1): 49-54 (in Chinese).
 412 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.
 413 Fan S Y, Guo Y R, Chen M, et al, 2008. Application of WRF 3D var to a high resolution model over Beijing area[J]. Plateau Meteor, 27(6):
- 414 1181-1188 (in Chinese).
 415 傅娜, 陈葆德, 谭燕, 等, 2013. 基于快速更新同化的滞后短时集合预报试验及检验[J]. 气象, 39(10): 1247-1256. Fu N, Chen
 416 B D, Tan Y, et al, 2013. Time-lag ensemble forecasting experiment and evaluation based on SMB-WARR[J]. Meteor Mon, 39(10):

417 1247-1256 (in Chinese).

418 黄丽萍,陈德辉,邓莲堂,等,2017. GRAPES_Meso V4.0 主要技术改进和预报效果检验[J]. 应用气象学报,28(1):25-37.

Huang L P, Chen D H, Deng L T, et al, 2017. Main technical improvements of GRAPES_Meso V4.0 and verification[J]. J Appl Meteor
Sci, 28(1): 25-37 (in Chinese).

421 李佰平,智协飞,2012. ECMWF 模式地面气温预报的四种误差订正方法的比较研究[J]. 气象,38(8): 897-902. Li B P, Zhi X F,
422 2012. Comparative study of four correction schemes of the ECMWF surface temperature forecasts[J]. Meteor Mon, 38(8): 897-902 (in
423 Chinese).

424 马旭林,时洋,和杰,等,2015. 基于卡尔曼滤波递减平均算法的集合预报综合偏差订正[J]. 气象学报,73(5): 952-964. Ma X
425 L, Shi Y, He J, et al, 2015. The combined descending averaging bias correction based on the Kalman filter for ensemble forecast[J]. Acta
426 Meteor Sin, 73(5): 952-964 (in Chinese).

427 盛春岩, 薛德强, 雷霆, 等, 2006. 雷达资料同化与提高模式水平分辨率对短时预报影响的数值对比试验[J]. 气象学报, 64(3):

428 293-307. Sheng C Y, Xue D Q, Lei T, et al, 2006. Comparative experiments between effects of Doppler radar data assimilation and

429 inceasing horizontal resolution on short-range prediction[J]. Acta Meteor Sin, 64(3): 293-307 (in Chinese).

430 唐文苑,郑永光,2019. 基于快速更新同化数值预报的小时降水量时间滞后集合订正技术[J]. 气象,45(3):305-317. Tang W Y, 431 Zheng Y G, 2019. Improvement of hourly precipitation forecast using a time-lagged ensemble based on rapid refresh assimilation and 432 forecast[J]. Meteor Mon, 45(3): 305-317 (in Chinese). 433 托亚,梁海河,马淑芬,等,2003. 用雷达观测资料改进 MM5 初始场的初步试验研究[J]. 南京气象学院学报,26(5):661-667. 434 Tuo Y, Liang H H, Ma S F, et al, 2003. A preliminary research on improving MM5 initial fields using radar data[J]. J Nanjing Inst Meteor, 435 26(5): 661-667 (in Chinese). 436 王丹,黄少妮,高红燕,等,2016. 递减平均法对陕西 SCMOC 精细化温度预报的订正效果[J]. 干旱气象,34(3):575-583. Wang 437 D, Huang S N, Gao H Y, et al, 2016. Analysis on errors of SCMOC refined guidance temperature prediction corrected by the decaying 438 averaging method in Shaanxi province[J]. J Arid Meteor, 34(3): 575-583 (in Chinese). 439 王婧, 徐枝芳, 范广洲, 等, 2015. GRAPES_RAFS 系统 2m 温度偏差订正方法研究[J]. 气象, 41(6): 719-726. Wang J, Xu Z F, 440 Fan G Z, 2015. Study on bias correction for the 2 m temperature forecast of GRAPES_RAFS[J]. Meteor Mon, 41(6): 719-726 (in 441 Chinese). 442 王敏,李晓莉,范广洲,等,2012. 区域集合预报系统 2m 温度预报的校准技术[J]. 应用气象学报,23(4):395-401 Wang M, Li 443 X L, Fan G Z, et al, 2012. Calibrating 2 m temperature forecast for the regional ensemble prediction system at NMQ[J]. J 444 Sci, 23(4): 395-401 (in Chinese). 445 王学忠,沙文钰,端义宏,2003.利用卫星云图变分同化初始场对热带气旋路径影响的数值试验[J].热带气 象学报, 19(1): 446 107-112. Wang X Z, Sha W Y, Duan Y H, 2003. A numerical study of tropical cyclone forecasting based on satellite images variational 447 assimilation initial field[J]. J Trop Meteor, 19(1): 107-112 (in Chinese). 448 王叶红, 彭菊香, 公颖, 等, 2011. AREM-RUC 3h 快速更新同化预报系统的建立与实时预报对比检验[J]. 暴雨灾害, 30(4): 449 296-304. Wang Y H, Peng J X, Gong Y, et al, 2011. Establishment and real-time forecasting verification of AREM-RUC 3 h rapid update 450 assimilation and forecast system[J]. Torr Rain Dis, 30(4): 296-304 (in Chinese). 451 许晨璐, 王建捷, 黄丽萍, 2017. 千米尺度分辨率下 GRAPES-Meso4.0模式定量降水预报性能评估[J]. 气象学报, 75(6): 452 851-876. Xu C L, Wang J J, Huang L P, 2017. Evaluation on QPF of GRAPES Meso4.0 model at convection-permitting resolution[J]. 453 Acta Meteor Sin, 75(6): 851-876 (in Chinese). 454 徐枝芳,郝民,朱立娟,等,2013. GRAPES_RAPS系统开发[J]. 气象,39(4): 466-477. Xu Z F, Hao M, Zhu L J, et al, 2013. On the research and development of GRAPES_RAFS[1]_Meteor Mon. 39(4): 466-477 (in Chinese). 455 456 薛纪善, 庄世宇, 朱国富, 等, 2008. GRAPES 新一代全球/区域变分同化系统研究[J]. 科学通报, 53(20): 2408-2417. Xue J S, 457 Zhuang S Y, Zhu G F, et al, 2008. Scientific design and preliminary results of three-dimensional variational data assimilation system of 458 GRAPES 459 [J]. Chin Sci Bull, 53(20): 2408-2417 (in Chinese). (查阅所有网上资料,未找到对应的英文翻译,请确认) 460 吴俞, 等, 2017. 雷达资料同化在局地强对流预报中的应用[J]. 大气科学, 41(4): 673-690. Xue C B, Chen X, Wu 薛谌彬,陈娟, 461 Y, et al, 2017. Application of radar data assimilation in local severe convective weather forecast[J]. Chin J Atmos Sci, 41(4): 673-690 (in 462 Chinese) 463 薛谌彬,陈婉,张瑛,等,2019. ECMWF 高分辨率模式 2m 温度预报误差订正方法研究[J]. 气象,45(6): 831-842. Xue C B, 464 Chen X, Zhang Y, et al, 2019. Bias correction method for the 2 m temperature forecast of ECMWF high resolution model[J]. Meteor Mon, 465 45(6): 831-842 (in Chinese). 466 张玉涛, 佟华, 孙健, 2020. 一种偏差订正方法在平昌冬奥会气象预报的应用[J]. 应用气象学报, 31(1): 27-41. Zhang Y T, Tong 467 H, Sun J, 2020. Application of a bias correction method to meteorological forecast for the Pyeongchang Winter Olympic Games[J]. J Appl 468 Meteor Sci, 31(1): 27-41 (in Chinese). 469 赵滨,张博,2018. 一种 2m 温度误差订正方法在复杂地形区数值预报中的应用[J]. 大气科学学报,41(5):657-667. Zhao B, 470 Zhang B, 2018. Application of a bias correction scheme for 2-meter temperature levels over complex terrain[J]. Trans Atmos Sci, 41(5): 471 657-667 (in Chinese). 472 庄照荣, 陈静, 黄丽萍, 等, 2018. 全球和区域分析的混合方案对区域预报的影响试验[J]. 气象, 44(12): 1509-1517. Zhuang Z 473 R, Chen J, Huang L P, et al, 2018. Impact experiments for regional forecast using blending method of global and regional analyses[J].

- 474 Meteor Mon, 44(12): 1509-1517 (in Chinese).
- 475 庄照荣, 王瑞春, 李兴良, 2020. 全球大尺度信息在3km GRAPES-RAFS系统中的应用[J]. 气象学报, 78(1): 33-47. Zhuang Z R,
- 476 Wang R C, Li X L, 2020. Application of global large scale information to GRAEPS RAFS system[J]. Acta Meteor Sin, 78(1): 33-47 (in
- 477 Chinese).
- 478 Benjamin S G, Dévényi D, Weygandt S S, et al, 2004. An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC[J]. Mon Wea Rev, 132(2): 479 495-518.
- 480 Benjamin S G, Devenyi D, Smirnova T, et al, 2006. From the 13-km RUC to the rapid refresh[J]. AMS Annual Meeting. (查阅所有 481
- 网上资料,请确认本条文献信息)
- 482 Benjamin S G, Weygandt S S, Brown J M, et al, 2016. A North American hourly assimilation and model forecast cycle: The rapid 483 refresh[J]. Mon Wea Rev, 144(4): 1669-1694.
- 484 Ma X L, Zhuang Z R, Xue J S, et al, 2009. Developments of the three-dimensional variational data assimilation system for the
- 485 Nonhydrostatic GRAPES[J]. Acta Meteor Sin, 23(6): 725-737.
- 486