

吴乃庚,曾沁,刘段灵,等,2017. 日极端气温的主客观预报能力评估及多模式集成网格释用[J]. 气象,43(5):581-590.

日极端气温的主客观预报能力评估及 多模式集成网格释用^{*}

吴乃庚^{1,2} 曾沁² 刘段灵² 陈炳洪² 赵声蓉³ 张红艳²

1 中国气象局广州热带海洋气象研究所/区域数值天气预报重点实验室,广州 510080

2 广东省气象台,广州 510080

3 国家气象中心,北京 100081

提 要:精细格点天气预报是我国未来几年天气预报业务发展重点。利用 ECMWF、GRAPES 等业务数值模式和广东站点观测资料,对日极端气温的主客观预报能力进行了多角度综合评估。统计结果表明, T_{\max} 、 T_{\min} 的主客观预报误差均存在明显季节差异,在系统误差相对平稳的夏半年主观预报具有较明显订正能力,模式预报呈现一定流依赖特征,温度越高(低),负(正)偏差越明显;主客观预报误差空间分布均受地形影响,随着时效延长误差总体增幅不大,主观订正能力也较稳定。根据以上评估特征和网格预报特点,研究开发了一套多模式动态集成网格释用技术方案(McGF)。结果表明,相比单个模式的预报和主观预报,McGF 较明显提升了 T_{\max} 的预报技巧; T_{\min} 的模式预报偏差总体较 T_{\max} 偏小,McGF 提升幅度相对较小;网格释用后的广东区域预报能较合理反映气温空间和强度特征,较周边未经释用区域明显更优。

关键词:最高(低)气温,预报评估,多模式集成,网格释用

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.05.007

Evaluation on Subjective and Objective Diurnal Extreme Temperature Forecasts and Multi-Model Consensus Gridded Forecast Application

WU Naigeng^{1,2} ZENG Qin² LIU Duanling² CHEN Binghong²
ZHAO Shengrong³ ZHANG Hongyan²

1 Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology/Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction,
CMA, Guangzhou 510080

2 Guangzhou Meteorological Observatory, Guangzhou 510080

3 National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Digital gridded weather forecast is the developing trend of weather forecasting operation in China. Based on NWP model products, meteorological observation data and an evaluation on subjective and objective forecast, a diurnal extreme temperature Multi-model Consensus Gridded Forecast (McGF) system was developed. Statistical results show that there are significant seasonal forecast error differences in both subjective and objective forecasts, and forecasters have more forecasting skills in summer, when the NWP systemaitc errors are more stable. NWP model shows a flow dependent (conditional bias) characteristic. When the temperature is higher (lower), the negative (positive) forecast error is bigger. Both subjective and objective forecasts are affected by topography and there are relatively significant forecast errors

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406003)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2015-052)和华南区域气象科技攻关重点项目(GRMC2014Z02)共同资助

2016年6月13日收稿; 2017年3月17日收修定稿

第一作者:吴乃庚,主要从事热带灾害性天气气候机理诊断及预测研究. Email:wung@grmc.gov.cn

in the northern mountainous areas. As the lead time of forecast extends, the growth of forecast errors is, not big and the subjective forecasting skills are stable relatively. Based on these results, McGF interpretation application system was developed with four modules, including real-time verification, station-based interpretation, gridded application and performance-weighted averages. The results showed that T_{\max} forecasts of McGF are better than subjective and objective forecasts, with its mean absolute errors less than 2°C within 72 h. Relatively speaking, T_{\min} forecast errors are much lower and the enhancements of McGF are relatively small. The cases of extreme high/low temperature showed that McGF gridded forecasts in Guangdong Province can more reasonably reflect the spatial distribution and intensity feature.

Key words: maximum (minimum) temperature, forecast evaluation, multi-models consensus, gridded interpretation

引言

随着过去几十年科学技术的不断发展积累,数值天气预报模式水平提高引起的“悄然革命”得到了各界高度关注(Bauer et al, 2015),数值天气预报模式已逐渐成为了各国气象预报业务机构最重要的技术支撑。应用研究表明,尽管近几年模式的预报水平快速提高,但相对于形势预报,其要素预报性能离实际需求仍有一定差距,业务中应用需对模式直接输出结果(direct model output, DMO)进行偏差订正(Monache et al, 2011; 陈法敬等, 2011; 赵声蓉等, 2012; Andersson, 2013; 陈良吕等, 2014; 王婧等, 2015)。

关于模式的偏差订正,20 世纪 70 年代初 Glahn and Lowry(1972)和 Lowry and Glahn (1976)根据数值模式不断发展的特点提出的模式输出统计方法(model output statistics, MOS)在气象业务应用最为广泛,也是美国国家天气局要素预报业务中至今一直在发展应用的重要方法,很多气象学者利用 MOS 方法结合不同地区和不同要素特点进行模式释用并取得了一定的效果(Glahn and Lowry, 1972; 丁士晟, 1985; Glahn, 2014)。由于传统 MOS 方法需较长时间的模式历史预报资料,建立的方程更多地反映采样期间各变量和预报对象的平均关系并不能根据最新变化及时更新,在现代数值模式快速发展、气象要素预报需求越发精细的背景下其弊端逐渐显现(Jacks et al, 1990; Vislocky and Frisch, 1995; Monache et al, 2011)。因此,在传统 MOS 方法基础上,一些学者运用只需较少模式资料即可滚动更新的卡尔曼滤波等方法,对一些较连续的要素预报进行改进。谢庄和黄嘉佑(1993)指出利用卡尔

曼滤波技术能一定程度解决 MOS 方程建模更新慢的问题,实现方程自适应更新。张庆奎(2009)针对最高最低温度预报,利用卡尔曼波对基于 MOS 方法建立的多元回归方程进行动态调整,试验结果表明动态调整后的结果有一定改善,特别是在秋、冬转换季节中效果更突出。虽然如此,卡尔曼滤波也存在 MOS 方法类似的对预报因子选取比较敏感且预报有滞后的问题(任宏利和丑纪范, 2005)。另一方面,业务和研究均表明,多模式综合集成预报既能发挥各模式预报结果的优势具有更好的预报技巧,且不会因某个模式性能变化导致综合结果的较大变动(Krishnamurti et al, 1999; 2000; Elizabeth, 2001; Woodcock and Engel, 2005),近年模式释用订正也逐渐向多模式集成发展。Krishnamurti et al(1999; 2000)最早提出了多模式超级集合预报的思想,并随后对 850 hPa 风场、降水和飓风路径强度等进行了超级集合预报试验,发现其能有效减少误差。智协飞等(2009)、Zhi et al(2012)、李佰平和智协飞(2012)和张涵斌(2015)利用近年 TIGGE 科学计划的多模式集合预报资料,应用多模式集合预报技术对北半球中纬度气温、降水和西太平洋台风进行分析应用,亦取得了较单模式更优的结果。业务应用方面,Woodcock and Engel(2005)利用澳大利亚多家业务数值模式和区域 MOS 产品,综合考虑不同模式近期预报表现基础上动态集成(operational consensus forecasts, OCF)建立了全国客观站点指导预报,性能较模式 DMO 结果改善明显。漆梁波等(2007)将 OCF 方法应用于上海区域模式及释用产品进行站点预报,释用结果表明 OCF 方法较卡尔曼滤波和模式 DMO 均有一定正效果,其中冬、春季气温预报水平与主观预报相当,而夏、秋季节结果改善不明显。张秀年等(2011)利用 T213 和 ECM-

WF 模式产品,对集成 MOS 方法在温度预报作了研究,结果表明多模式集成 MOS 方法较传统 MOS 方法效果更好。刘还珠等(2004)和赵声蓉等(2012)持续发展我国 MOS 客观气象要素预报系统,近年通过大量因子建模、多模式集成等方面改进,有效提高了城镇站点客观要素指导预报水平。同时,针对近年精细格点预报业务变革,Glahn et al(2009)在过去几十年一直发展的站点 MOS 系统基础上,把 Bergthorssen、Cressman 和 Doos 提出的逐步订正的插值分析方法(BCD 法),拓展为增加考虑不同下垫面和地形高度影响的格点应用(BCDG 法),将 NCEP-GFS 模式的站点 MOS 结果插值分析到 2.5 km 分辨率的格点,为美国格点预报业务提供支撑(Ruth et al,2009),但该方案也难以避免由“插值分析”带来的不确定误差,并且需获取大量精细的下垫面信息,站点布局需有一定海拔落差,计算量也较大。

总体而言,在传统的 MOS 方法基础上,模式的释用方法逐渐呈现出从“固定方程向自适应调整、单模式向多模式集合转变、站点释用向精细格点释用拓展”的趋势,但目前来说,综合订正技术发展的三大趋势,特别是格点预报的集成应用技术研究仍较少见。未来几年,从传统的站点预报向格点预报转变将是我国天气预报业务改革发展重要方向,面对大量精细格点预报,有必要加强对高分辨率数值模式的格点释用订正技术研究,综合发挥客观技术和预报员主观经验作用。

本文结合模式偏差订正技术发展趋势及较早在国内开展格点预报探索的广东省气象台业务实际,针对日极端气温预报,在对主客观预报能力综合评估基础上,开发一套以近期检验为基础动态更新、多模式集成的网格释用技术方案,以期今后格点预报业务开展提供一些参考。

1 资 料

(1) 预报资料:2014 年 1 月 1 日至 12 月 31 日,每日 12 UTC 起报的欧洲中期天气预报中心(EC-MWF)的全球模式温度预报数据,分辨率为 0.25° ;中国气象局/广东区域数值预报重点实验室区域模式(GRAPES)的 0.12° 和 0.36° 分辨率温度预报数据;广东省气象台(GDMO)5 km 分辨率的格点温度预报数据。由于资料传输和存储故障部分数据有缺

失,ECMWF、GRAPES 和 GDMO 年内有效数据天数分别为 357、298 和 365 d。

(2) 实况资料:2014 年 1 月 1 日至 12 月 31 日,广东省 86 个国家级自动气象站日最高、最低气温观测数据。

(3) 地形资料:广东省 1 km 分辨率地理信息高程数据,包括高度、坡向和坡度等。

对于同一起报时间,实际预报业务制作时主要参考为模式提前 12~24 h 起报的产品,但考虑到本文主要目的并非分析主观预报订正技巧,为简便起见,下文提及“订正技巧”均指同起报时次预报。

2 日极端气温主客观预报能力评估

开展模式偏差订正,从主客观预报能力深入分析其在本地预报的系统偏差(可订正)特征十分重要。为直观对比,模式和主观预报分别选取国内外应用最广泛的 ECMWF 模式和全国格点预报业务试点省(广东省气象台网格预报)为代表,通过空间插值将网格预报产品插值到气象观测站进行评估。对温度预报的定量评估,已有研究(Woodcock and Engel,2005;周兵等,2006;漆梁波等,2007;张秀年等,2011)多采用能反映整体预报偏差幅度的平均绝对误差(MAE)或均方根误差(RMSE),但两者均存在不能反映误差正负方向问题。平均误差(ME)虽出现正负相抵情况,难以反映整体偏差幅度,但也提供重要的天气信息(Nurmi,2003;Wilks,2006),ME 表征的方向性适合用于定量预报订正,预报员思考应用更多也是 ME。因此,为综合衡量主客观预报能力和针对性地设计释用方案,下面综合应用 MAE 和 ME 进行评估。ME 和 MAE 计算见式(1)和式(2)。

$$ME = \overline{T_{fc} - T_{ob}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [T_{fc}(k) - T_{ob}(k)] \quad (1)$$

$$MAE = \overline{|T_{fc} - T_{ob}|} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |T_{fc}(k) - T_{ob}(k)| \quad (2)$$

式中, T_{fc} 、 T_{ob} 分别为预报和观测值, n 为需要空间平均或时间平均的样本数量, k 为第 k 个样本。

2.1 T_{max} 和 T_{min} 预报偏差的季节差异

图 1a 为 ECMWF 模式在广东区域站点平均的 24 h T_{max} 预报的逐日 ME、|ME|、MAE 变化序列,

$|ME|$ 与 MAE 的值越接近越能反映预报大范围一致性偏高(低)。由图可见,ECMWF的 T_{\max} 预报偏差季节差异显著,冬半年(11月至次年4月) MAE 约 2°C ,夏半年(5—10月)则超过 3°C ;配合 ME 和 $|ME|$ 曲线可知,夏半年的偏差为稳定大范围的预报偏低(ME 持续为负偏差、 $|ME|$ 与 MAE 绝大部分时间重合)。总体来看,ECMWF对 T_{\max} 预报以偏低为主,夏半年 T_{\max} 预报误差更大,但为大范围稳定偏低,而春、秋过渡季节绝对误差较小,但持续偏向性差一些。

GDMO与ECMWF的 MAE 曲线明显相反(图1b),呈现为夏半年误差小(1.4°C)、冬半年(1.8°C)误差大的特征,其中在夏半年较ECMWF显著偏小。这表明尽管夏半年模式 T_{\max} 预报误差较大,但预报员对持续稳定的误差有明显订正能力。

对比 T_{\max} 而言, T_{\min} 预报 MAE 明显较小,且季节分布特征相反,呈现“冬半年大(约 1.5°C),夏半年小(约 1°C)”的特征。主客观对比可知,在 T_{\min} 相对平稳的夏半年,GDMO有一定正技巧,但在冬半年特别春、秋过渡季节,平均正技巧并不明显(图2)。

2.2 不同温度强度下 T_{\max} 和 T_{\min} 预报偏差的差异

为考察不同温度强度(一定程度反映天气类型)下 T_{\max} 、 T_{\min} 预报偏差的差异,图3给出了ECMWF模式 T_{\max} 、 T_{\min} 的平均误差($T_{\text{fc}} - T_{\text{ob}}$)及其气温预报(T_{fc})的散点分布。已有研究表明(Nurmi, 2003; Wilks, 2006; Andersson, 2013),如果 ME 独立于预报和围绕一个固定值变化,说明存在着非条件偏差(unconditional bias);而如果 ME 是流依赖(flow dependent),例如误差依赖于预报本身或其他参数,则存在着条件性偏向(conditional bias)的系统性误差,该情况表明其预报误差与大尺度天气流型密切相关。由图3a可见,当 T_{\max} 越高(低)呈现出越大的负(正)偏差,表明模式的 T_{\max} 预报呈现流依赖特征,存在明显条件性偏向,对较高(低)的气温模式预报更偏低(高),特别是 30°C 以上高温预报严重偏低。 T_{\min} 的预报亦呈现一些类似特征,但相对没那么明显(图3b)。

2.3 T_{\max} 和 T_{\min} 预报偏差的地区差异

图4给出的是 T_{\max} 、 T_{\min} 预报的 MAE 空间分布。从ECMWF预报结果可见,其 T_{\max} 、 T_{\min} 预报

MAE 均呈现出“北部高、沿海低”分布特征,且南北差异十分明显(北部部分地区误差较沿海偏高超过 2°C),而GDMO预报有类似特征,但南北差异相对较小。由此可见,尽管广东总体海拔不算太高,相对南部沿海来说,北部南岭山脉地形影响仍使得预报产生了更大的偏差。

2.4 不同预报时效 T_{\max} 和 T_{\min} 预报偏差的差异

从不同预报时效看(图5), T_{\max} 和 T_{\min} 均为时效越长误差越大,但总体误差增长不算太大,特别是 T_{\min} 预报误差仅增加约 0.3°C 。同时,GDMO预报有类似变化特征,且不同预报时效主观订正能力也较稳定(T_{\max} 约 0.7°C , T_{\min} 约 0.1°C),该结果一定程度上也反映了不同时效的主观预报订正思路和订正的系统误差可能具有一定相似性。

3 日极端气温的多模式动态集成网格预报释用及效果

前期主客观预报评估分析可知,时间和强度方面,模式对日极端气温预报往往存在“高温偏低、低温偏高”特征并具有一定的时间持续性,而主观预报的订正能力也主要在于持续性的系统偏差;空间分布和预报时效方面,山区地形对预报偏差产生影响,不同时效主观预报订正能力差异并不大。由此可见,对广东的网格预报的后处理释用,时间持续性偏差和地形影响偏差值得重点考虑。

根据评估分析结果,结合多模式集成和格点释用技术发展趋势,开发了一套多模式动态权重集成网格释用技术方案(multi-model consensus gridded forecast, McGF)。业务程序方案包括实时站点检验、单模式站点释用、格点应用订正和多模式动态权重集成四大部分(图6),程序实现模块化设计、模式数量、订正方案以及格点应用等可实现按用户需求定制。

3.1 站点实时检验

实时站点检验包括两部分:(1) ME 检验,考虑 ME 正负方向性适用于模式的定量预报订正,针对不同数值模式不同站点动态 ME 评估,用于各模式偏差订正。(2) MAE 检验,考虑 MAE 更能稳定反映模式的平均性能,对各集成成员模式的预报结果进行动态 MAE 评估,用于各模式权重集成。另外,

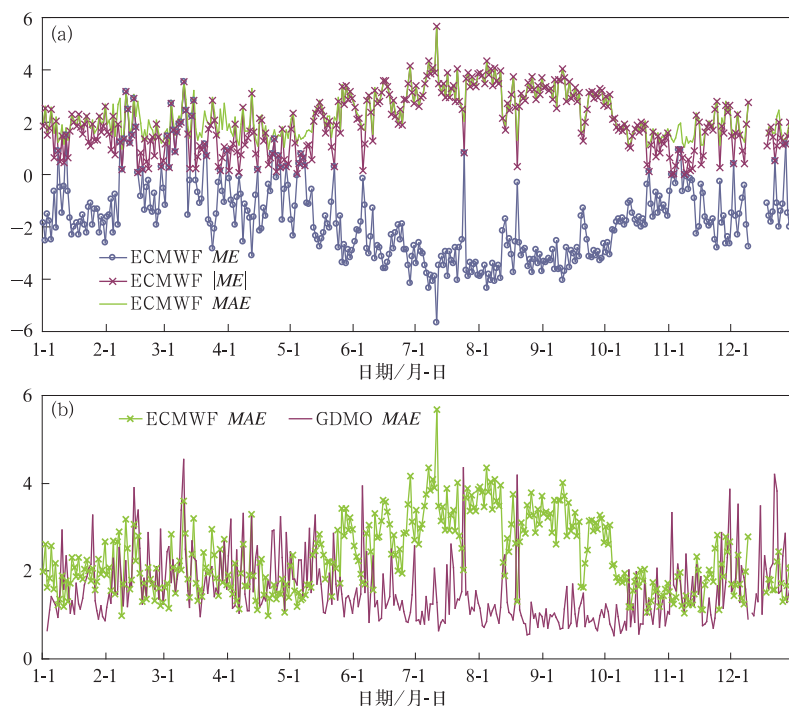


图 1 2014 年广东区域平均的 T_{\max} 24 h 预报误差序列(单位: $^{\circ}\text{C}$)

(a) ECMWF 的 ME 、 $|ME|$ 、 MAE , (b) ECMWF 和 GDMO 的 MAE

Fig. 1 Guangdong regional averaged T_{\max} forecast errors during

1 January to 31 December 2014 (unit: $^{\circ}\text{C}$)

(a) ME , $|ME|$ and MAE of ECMWF, (b) $MAEs$ of ECMWF and GDMO

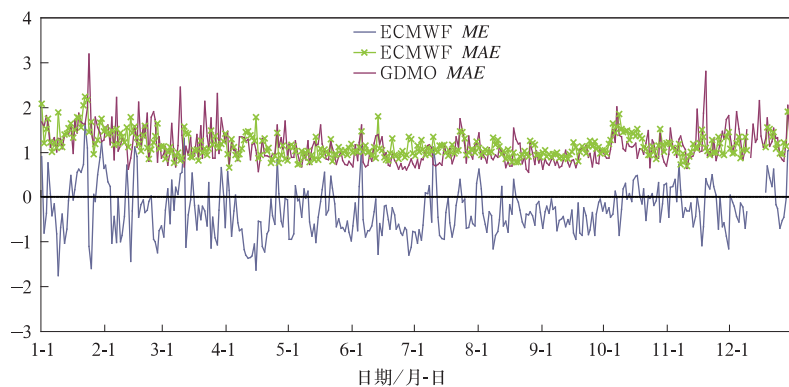


图 2 2014 年广东区域平均的 T_{\min} 24 h 预报 ECMWF 的 ME 、 MAE 和 GDMO 的 MAE 序列(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 2 Guangdong regional averaged T_{\min} ME/MAE of ECMWF and MAE of GDMO during 1 January to 31 December 2014 (unit: $^{\circ}\text{C}$)

考虑到模式误差的流依赖特征以及天气系统的短期波动,该方案时间滑动训练期默认设置为 7 d。

3.2 模式偏差订正

不同于传统站点应用,精细格点预报业务中具有大量数字网格,作为主观网格预报制作的初始场,客观订正方案应意义直观明确。基于前期模式性能

本地评估特点,重点考虑时间上的持续系统性偏差、空间上的山区地形造成偏差两方面进行订正。

(1) 时间持续偏差订正:针对模式预报常存在持续系统性偏差,计算出各集成成员在不同观测站过去 7 d 的 ME ,据此分别进行订正。站点订正结果 $T(t)$ 计算见式(3),其中根据滑动训练期 n 取为 7,另考虑到转折性天气较大误差波动以及模式业务

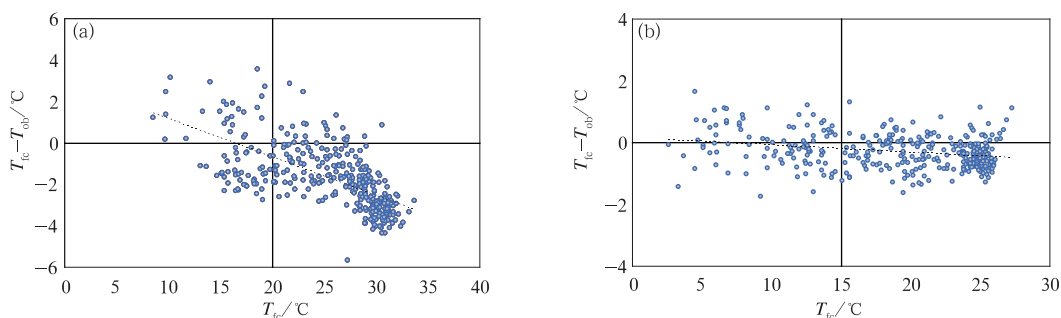


图 3 2014 年广东区域平均 ECMWF 模式 (a) T_{\max} 、(b) T_{\min} 24 h 预报平均误差及其预报值的散点分布
(单位: $^{\circ}\text{C}$, 虚线为线性趋势线)

Fig. 3 Scatter diagrams of forecasts vs. forecast errors for Guangdong regional average based on the ECMWF model (a) T_{\max} and (b) T_{\min} in 2014
(The dotted lines stand for linear trend lines, unit: $^{\circ}\text{C}$)

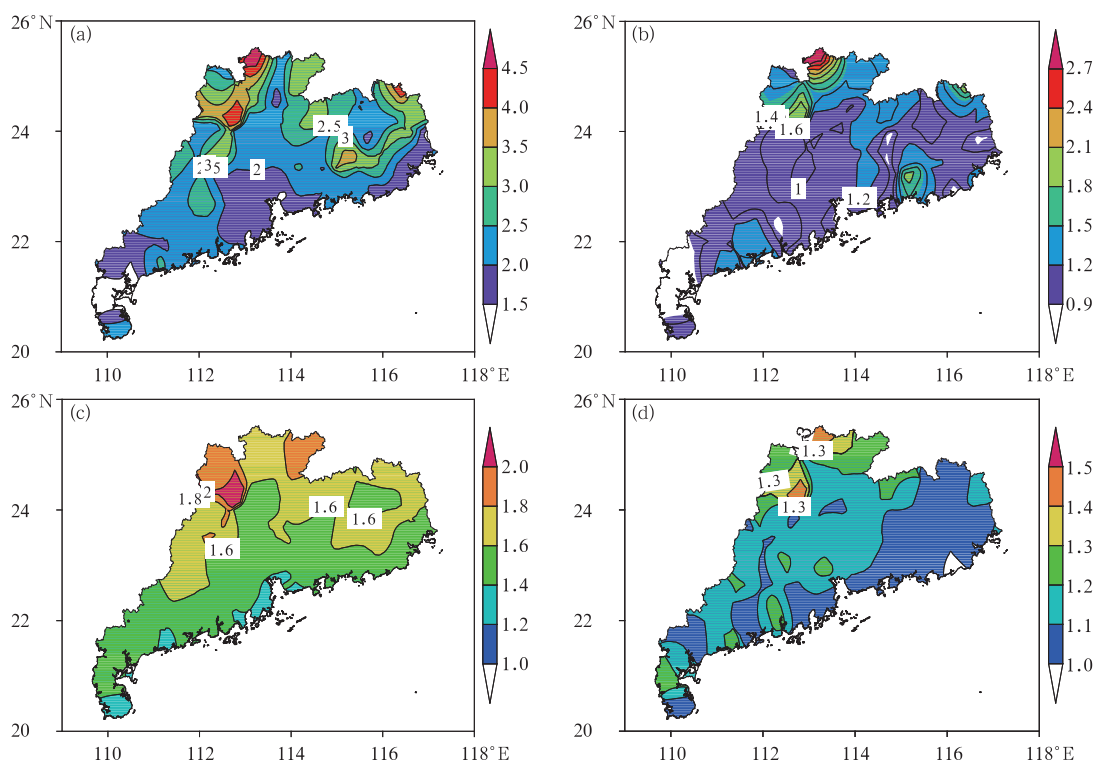


图 4 2014 年平均的 T_{\max} (a, c) 和 T_{\min} (b, d) 的 ECMWF (a, b) 和 GDMO (c, d) 24 h 预报 MAE 空间分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 4 Spatial distribution of MAEs for Guangdong area in 2014 (unit: $^{\circ}\text{C}$)

(a) T_{\max} of ECMWF, (b) T_{\min} of ECMWF, (c) T_{\max} of GDMO, (d) T_{\min} of GDMO

中偶尔出现部分时次资料丢失情况,定义滑动训练期内模式极端气温预报(T_{fc})与实况(T_{ob})偏差超过 5°C ,则认为该训练日不具有参考价值,将其剔除。

$$T(t) = T_{\text{fc}}(t) + ME(t) = T_{\text{fc}}(t) + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [T_{\text{fc}}(t-k) - T_{\text{ob}}(t-k)] \quad (3)$$

(2) 空间地形影响订正:前期评估结果可知,尽管广东的国家观测站海拔不高(超过 150 m 的仅 6 个),地形对预报误差仍有一定影响。同时广东丘陵

地形多,模式网格地形与真实地形存在较大差异,对精细格点气温分布将有较大影响。因此,进行地形影响订正,格点订正结果 T 的计算见式(4),其中 H_{true} 、 H_{model} 分别为真实地形和模式地形高度,垂直温度递减率 γ^* 采用基于广东立体气候梯度观测站计算结果(刘尉等,2013)。

$$T' = T_{\text{fc}} + \Delta T = T_{\text{fc}} + \frac{1}{100} (H_{\text{model}} - H_{\text{true}}) \gamma^* \quad (4)$$

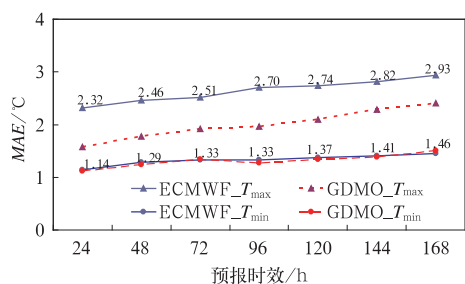


图5 2014年平均的 T_{\max}/T_{\min} 不同预报时效的预报 MAE 序列图

Fig. 5 MAEs versus forecast hours of T_{\max}/T_{\min} forecasts for Guangdong area in 2014

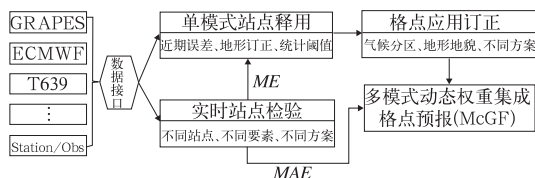


图6 多模式动态集成网格释用业务技术流程图
Fig. 6 Technological flowchart of multi-model consensus gridded forecast

3.3 站点向格点应用

有关格点预报释用,目前的应用研究仍较少。对于格点预报业务而言,简单的站点插值应用意义不大,而以区域站点组合发展代表方程的方式虽具有一定代表性,但准确率较单站点差且存在明显的边界不连续问题,对于精细格点预报带来较大影响(Glahn et al, 2009)。Glahn et al (2009)在原有MOS系统基础上开展的GRIDDING MOS方案主要考虑地形和下垫面影响,将站点MOS结果插值分析到格点,较好地解决了精度和边界问题,但其实

施一方面引入了“插值”误差,另一方面也需大量精细下垫面信息、站点布局需有一定海拔落差(>130 m)且计算量较大。

基于业务实际及预报员关注更多的是站点实况结果,且下垫面对气温的影响深入研究目前而言并不足够精细合理,为减少引入类似“插值”带来的不确定误差,根据气候分区、地形特点和站点距离等影响,本文设计了一套站点向格点应用的方案。站点与格点关联原则如下(按先后顺序):

(1) 格点与相关站点应属同一气候分区[本文分区基于刘黎明和陈创买(1998)研究结果];

(2) 格点与相关站点应地貌相似(根据1 km地理信息资料计算,坡向接近, 90° 以内);

(3) 与格点距离最近的站点(若出现多个满足条件站点,以最近的为准)。

根据站点与格点映射对应关系(图7),将基于站点观测的ME、MAE等应用至相应格点,为模式偏差订正以及模式动态权重集成提供基础(该映射对应关系可提供台站本地进一步动态修正)。

3.4 动态权重集成方案

研究表明,根据模式最近一段时间的误差来确定权重(performance-weighted averages)往往比固定权重平均的合成好(Young, 2002; Woodcock and Engel, 2005)。本文成员权重根据过去7 d的MAE检验结果动态计算,MAE越大的成员,权重系数越小。系数计算见式(5),其中 n 代表成员总数, i 表示某一成员, w 表示权重。

$$w_i = \text{MAE}_i^{-1} \left(\sum_{i=1}^n \text{MAE}_i^{-1} \right)^{-1} \quad (5)$$

集成释用结果(McGF):根据前面各模式偏差

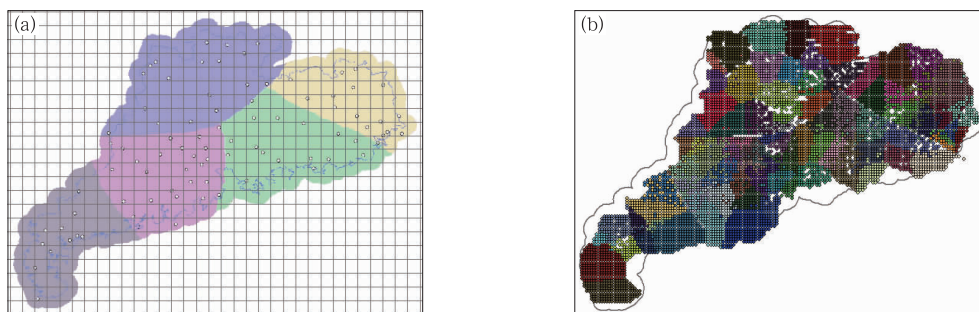


图7 考虑气候分区、地形地貌的站点(a)与格点关联(b)示意图
(图7a填色代表不同的气候分区,圆点代表观测站点;图7b填色代表不同站点映射关联的区域)

Fig. 7 Schematic diagram of associated stations (a) and grids (b)

(Shaded areas in Fig. 7a represent different climate subarea; dots are for observation sites;
shaded areas in Fig. 7b represent areas related to different sites)

订正后的结果(T'_i)进行动态权重集成。

$$McGF = \sum_1^n w_i T'_i \tag{6}$$

3.5 释用效果评估

为了解释用效果,下面从业务常用的 MAE、准确(偏差)率分别进行评估,并结合实例给出格点释用空间分布效果。

(1) 平均绝对误差评分

对比主客观预报可见(图 8),对于 T_{\max} 预报,McGF 的 MAE 评分 24、48 和 72 h 分别为 1.30、1.57 和 1.81℃,均较模式和主观预报有较大提升,其中较 ECMWF、GRAPES 模式和 GDMO 预报分别提高约 0.7、0.4 和 0.3℃。 T_{\min} 主客观预报误差均较 T_{\max} 偏低,McGF 较 GRAPES 模式提升约 0.4℃,但较 ECMWF 和 GDMO 提升幅度不大($<0.1^\circ\text{C}$)。

(2) 预报准确(偏差)率

为进一步考察 McGF 的预报性能和稳定性,表 1 给出了准确率和偏差率对比(若对当日广东区域平均预报 $\text{MAE}<1.5^\circ\text{C}$ 视为“准确”、 $\text{MAE}>2.5^\circ\text{C}$ 则视为

“偏差”;准确(偏差)率= $\frac{\text{准确(偏差)天数}}{\text{总天数}} \times 100\%$ 。

由表 1 中可见,对于 T_{\max} 预报,McGF 方案对 72 h 内预报准确率分别达 75%、62% 和 52%,明显较其他模式高;而偏差率也明显更小,特别是 24 h 预报偏差率仅 4%。

T_{\min} 预报准确率明显较 T_{\max} 高,McGF 的准确率较表现最好的成员(ECMWF)提高仅约 1%~2%,而偏差率甚至更高一些。这表明对于模式整体误差较小且无明显稳定性系统偏差的 T_{\min} 预报,集成方案准确率能保持在较高水平,但异常偏差率较最好成员略有增多。

(3) 格点预报的实例

McGF 方案除了传统站点预报技巧评分外,精细格点预报分布是其重要特色。为考察格点预报效果,图 9 分别给出了一个显著的高温和低温实例。McGF 输出为 5 km 分辨率的矩形网格场,其中图 7 所示的广东区域内采取偏差订正和权重集成,广东省外则为各模式加权平均。由图可见,对于 T_{\max} 和 T_{\min} 预报,McGF 释用订正后的广东区域结果均较好地体现了气温的精细分布,特别是广东不多见的

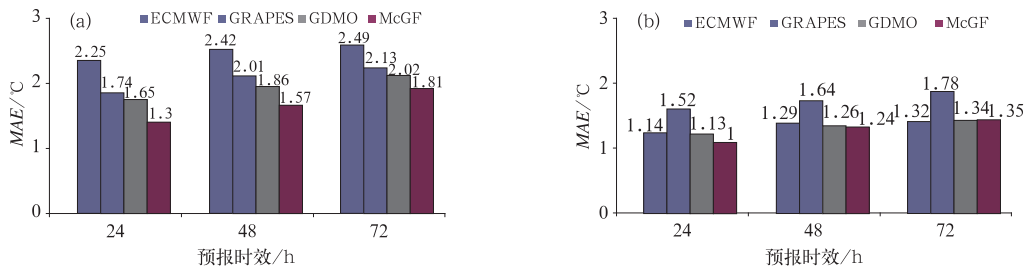


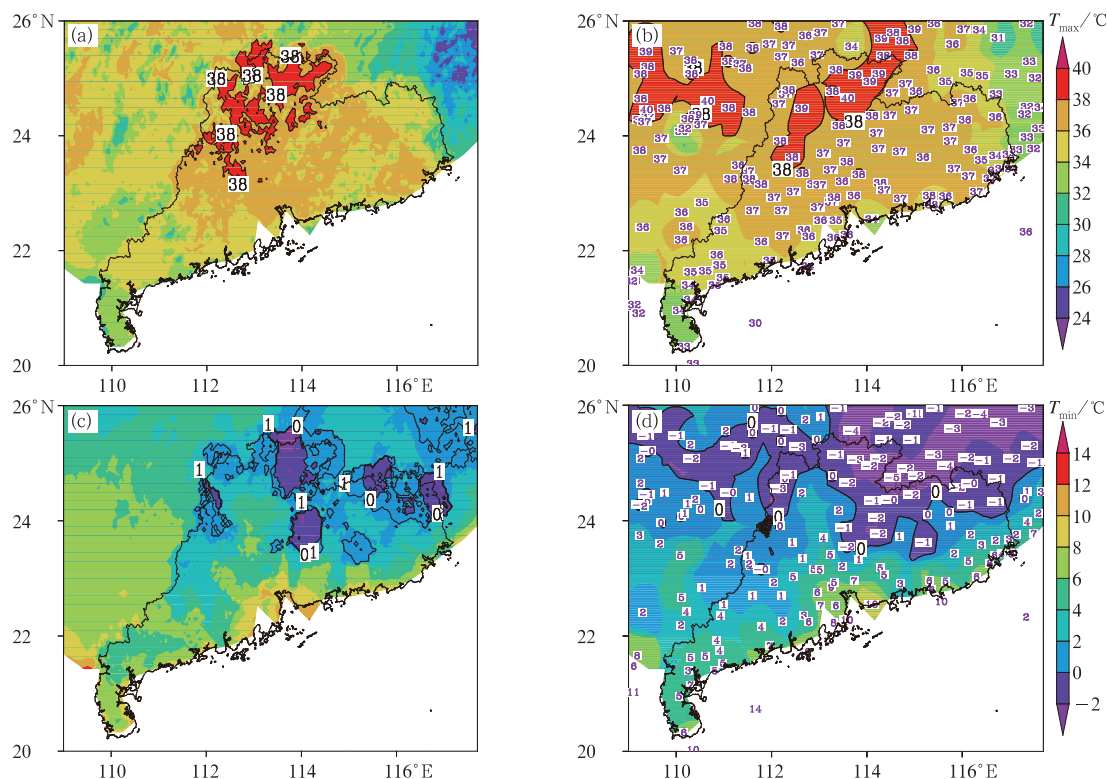
图 8 2014 年广东区域平均的主客观日极端气温预报 T_{\max} (a) 和 T_{\min} (b) 的 MAE(单位: $^\circ\text{C}$)

Fig. 8 MAEs versus forecast hours of (a) T_{\max} and (b) T_{\min} of ECMWF, GRAPES, GDMO and McGF for Guangdong area in 2014 (unit: $^\circ\text{C}$)

表 1 2014 年广东区域平均 T_{\max} 、 T_{\min} 预报准确率和偏差率

Table 1 Comparison of ECMWF, GRAPES, GDMO and McGF accuracy/error rate

	预报时效/h	ECMWF(357 d)	GRAPES(298 d)	GDMO(365 d)	McGF(362 d)
T_{\max} 预报 ($\text{MAE}<1.5^\circ\text{C}$)	24	17%	43%	58%	75%
	48	12%	30%	50%	62%
	72	10%	26%	41%	52%
T_{\max} 预报 ($\text{MAE}>2.5^\circ\text{C}$)	24	38%	14%	11%	4%
	48	42%	23%	18%	11%
	72	43%	26%	21%	17%
T_{\min} 预报 ($\text{MAE}<1.5^\circ\text{C}$)	24	89%	60%	85%	89%
	48	77%	54%	78%	79%
	72	73%	47%	72%	74%
T_{\min} 预报 ($\text{MAE}>2.5^\circ\text{C}$)	24	0.0%	7%	1%	2%
	48	0.2%	10%	2%	6%
	72	1.1%	14%	5%	7%

图9 2014年7月23日 T_{\max} (a,b)和1月23日 T_{\min} (c,d)McGF 24 h 预报(a,c)和实况(b,d)分布(单位: $^{\circ}\text{C}$)Fig. 9 Spatial distribution of diurnal extreme temperature forecasts of McGF (a, c) and observation (b, d) (unit: $^{\circ}\text{C}$)(a, b) 24 h T_{\max} on 23 July 2014, (c, d) 24 h T_{\min} on 23 January 2014

大范围 38°C 以上高温区域、大范围 0°C 以下低温区域均与实况有较好对应。同时,对比广东省和周边区域可见,经过偏差订正和权重集成后的广东区域预报效果明显较好,而周边地区偏差较大(T_{\max} 预报偏低, T_{\min} 预报偏高)。

4 结论与讨论

结合模式偏差订正技术发展趋势以及格点预报试点省业务实际,针对日极端气温预报,在对主客观预报能力综合评估基础上,开发了一套多模式动态集成的网格释用技术方案。

(1) 季节差异方面, T_{\max} 主客观预报偏差季节差异显著,EC 模式夏半年较冬半年明显偏大,并出现大范围持续性预报偏低,而主观预报偏差特征则相反(夏半年误差小,冬半年误差大),对夏半年模式相对持续稳定的误差有较强订正能力; T_{\min} 主客观预报偏差较 T_{\max} 小,呈现夏(冬)半年误差小(大)的特征,在相对平稳的夏半年主观预报有一定正技巧。

(2) 强度预报方面,模式预报呈现一定流依赖特征,当气温越高(低)呈现出越大的负(正)偏差, 30°C 以上 T_{\max} 预报偏低严重。地区差异方面,主客观预报均受地形影响,北部山区误差相对较大。预报时效方面,主客观预报随预报时效延长总体误差增长不大,主观订正能力也较稳定。

(3) 结合前期评估分析,建立了包括实时站点检验、单模式站点释用、格点应用订正和多模式动态权重集成的业务网格释用方案(McGF)。结果表明,相比单个模式的预报和主观预报,McGF 较明显提升了 T_{\max} 的预报技巧; T_{\min} 的模式预报偏差总体较 T_{\max} 偏小,McGF 提升幅度相对较小。McGF 订正后的广东区域预报较好地体现了气温较精细的空间分布和强度特征,比周边未经网格释用区域明显较好。

值得注意的是,数值模式具备较完善动力热力过程,其产品后处理统计释用可以订正模式的偏差,也可能会引入不少不稳定误差。因此,业务客观释用方案重点在于对模式部分较稳定的系统性偏差进

行订正,便于有效发挥预报员和模式的综合作用。目前而言,McGF 工作仍较初步,释用结果对模式系统偏差订正有一定能力,但冬、春季节总体订正能力不高,转折性天气过程存在着调整滞后、偏差扩大等问题需主观预报进一步订正。另外,结合本地精细观测对主客观预报能力多维度动态评估、精细气候分区、模式过去误差的时间窗选择和下垫面对气温影响规律等亦需更多进一步工作。

参考文献

- 陈法敬,矫梅燕,陈静,2011. 一种温度集合预报产品释用方法的初步研究[J]. 气象,37(1):14-20.
- 陈良吕,陈静,陈德辉,等,2014. 基于 T213 集合预报的延伸期产品释用方法及初步试验[J]. 气象,40(11):1293-1301.
- 丁士晟,1985. 中国 MOS 预报的进展[J]. 气象学报,43(3):332-338.
- 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.
- 刘还珠,赵声蓉,陆志善,等,2004. 国家气象中心气象要素的客观预报-MOS 系统[J]. 应用气象学报,15(2):181-182.
- 刘黎明,陈创买,1998. 广东的气候分区[J]. 热带气象学报,1:47-53.
- 刘尉,王春林,陈新光,等,2013. 基于立体气候观测的粤北山区热量资源特征多[J]. 应用生态学报,24(9):2571-2580.
- 漆梁波,曹晓岗,夏立,等,2007. 上海区域要素客观预报方法效果检验[J]. 气象,33(9):9-18.
- 任宏利,丑纪范,2005. 统计-动力相结合的相似误差定制法[J]. 气象学报,63(6):988-992.
- 王婧,徐枝芳,范广州,等,2015a. RAPES_RAFS 对流 2 m 温度误差订正方法研究[J]. 气象,41(6):719-726.
- 谢庄,黄嘉佑,1993. 卡尔曼滤波在 MOS 方程自适应更新中的应用介绍[J]. 北京气象,(2):16-17.
- 张涵斌,智协飞,王亚男,等,2015. 基于 TIGGE 资料的西太平洋热带气旋多模式集成预报方法比较[J]. 气象,41(9):1058-1067.
- 张庆奎,2009. 基于 MOS 方法的客观温度预报模型的研究与应用[D]. 南京:南京信息工程大学.
- 张秀年,曹杰,杨素雨,等,2011. 多模式集成 MOS 方法在精细化温度预报中的应用[J]. 云南大学学报:自然科学版,33(1):67-71.
- 赵声蓉,赵翠光,赵瑞霞,等,2012. 我国精细化客观气象要素预报进展[J]. 气象科技进展,2(5):12-21.
- 智协飞,林春泽,白永清,等,2009. 北半球中纬度地区地面气温的超级集合预报[J]. 气象科学,32(5):569-574.
- 周兵,赵翠光,赵声蓉,2006. 多模式集合预报技术及其分析与检验[J]. 应用气象学报,17(S1):104-109.
- Andersson E, 2013. User guide to ECMWF forecast products: Version 1.1[Z]. ECMWF:113-118.
- Bauer P, Thorpe A, Brunet G, 2015. The quiet revolution of numerical weather prediction[J]. Nature,525(7567):47-55.
- Elizabeth E E, 2001. Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation[J]. Mon Wea Rev,129(10):2461-2480.
- Glahn B, 2014. Determining an optimal decay factor for bias-correcting MOS temperature and dew point forecasts[J]. Wea Forecasting,29(4):1076-1090.
- Glahn B, Gilbert K, Cosgrove R, et al, 2009. The Gridding of MOS [J]. Wea Forecasting,24(2):520-529.
- Glahn H R, Lowry D A, 1972. The use of Model Output Statistics (MOS) in objective weather forecasting[J]. J Appl Meteor,11(8):1203-1211.
- Jacks E, Bower J B, Dagostaro V J, et al, 1990. New NGM-based MOS guidance for maxima and minima temperature, probability of precipitation, cloud amount, and surface wind[J]. Wea Forecasting,5(5):128-138.
- Krishnamurti T N, Kishtawal C M, Larow T E, et al, 1999. Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble[J]. Science,285(5433):1548-1550.
- Krishnamurti T N, Kishtawal C M, Zhang Z, et al, 2000. Multimodel ensemble forecasts for weather and seasonal climate[J]. J Climate,13(23):4196-4216.
- Lowry D A, Glahn H R, 1976. An operational model for forecasting probability of precipitation-PEATMOS PoP[J]. Mon Wea Rev,104(3):221-232.
- Monache D, Nipen T, Liu Yubao, et al, 2011. Kalman filter and analog schemes to postprocess numerical weather predictions [J]. Mon Wea Rev,139(11):3554-3570.
- Nurmi P, 2003. Recommendations on the Verification of Local Weather Forecasts[Z]. ECMWF Tech Mem,430;5.
- Ruth D P, Glahn B, Dagostaro V, et al, 2009. The performance of MOS in the digital age[J]. Wea Forecasting,24(2):504-519.
- Vislocky R L, Frisch J M, 1995. Generalized additive models versus linear regression in generating probabilistic MOS forecasts of aviation weather parameters[J]. Wea Forecasting,10(4):669-680.
- Wilks D, 2006. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences [M]. 2nd ed. London:Academic Press:280.
- Woodcock F, Engel C, 2005. Operational consensus forecasts[J]. Wea Forecasting,20(1):101-111.
- Young G, 2002. Combining forecasts for superior prediction. Preprints[C]. 16th Conf on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences. Orlando:Amer Meteor Soc:107-111.
- Zhi Xiefei, Qi Haixia, Bai Yongqing, et al, 2012. A comparison of three kinds of multimodel ensemble forecast techniques based on the TIGGE data[J]. Acta Meteor Sin,26(1):41-51.