

基于 TIGGE 数据的西太平洋副热带高压 多模式集成预报及检验

颜妍¹, 周任君¹, 柯宗建², 刘长征², 杜良敏³, 苏琪骅¹

(1. 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 安徽合肥 230026; 2. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081;

3. 武汉区域气候中心, 湖北武汉 430074)

摘要: 基于 TIGGE (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble) 资料中的中国气象局 (CMA)、日本气象厅 (JMA)、欧洲中期天气预报中心 (ECMWF)、美国国家环境预报中心 (NCEP) 和英国气象局 (UKMO) 等 5 个中心的 500 hPa 位势高度场数据, 评估了各中心对西太副高控制预报和集合预报的效果, 并采用了多模式集成平均 (EMN)、消除偏差集成平均 (BREM) 和滑动训练期超级集合 (R_SUP) 3 种方法对各中心数据进行集成。评估方法包括 Talagrand 分布、相关系数、均方根误差、Brier 技巧评分等。结果表明: 各中心预报效果有明显差异, 各模式对 500 hPa 位势高度场控制预报中, UKMO 预报效果最好, 而各模式对 500 hPa 位势高度场集合预报中, 则是 ECMWF 预报效果最好。从均方根误差改进率来看, 基于控制预报的 BREM 和 R_SUP 集成方法明显降低了对 500 hPa 位势高度场预报的均方根误差, 而 EMN 则无明显改进。基于集合预报的 3 种集成方法对 500 hPa 位势高度场预报的改进效果不明显, 综合评分略低于 ECMWF 单模式集合预报。

关键词: TIGGE; 西太副高; 多模式集成; 预报

中图分类号: TP 391

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2017.05.004

引用格式: 颜妍, 周任君, 柯宗建, 等. 基于 TIGGE 数据的西太平洋副热带高压多模式集成预报及检验[J]. 中国科学技术大学学报, 2017, 47(5): 392-402.

YAN Yan, ZHOU Renjun, KE Zongjian, et al. Ensemble forecast and verification of the Western Pacific Subtropical High based on multi-model data from TIGGE[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017, 47(5): 392-402.

Ensemble forecast and verification of the Western Pacific Subtropical High based on multi-model data from TIGGE

YAN Yan¹, ZHOU Renjun¹, KE Zongjian², LIU Changzheng², DU Liangmin³, SU Qihua¹

(1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230016, China;

2. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

3. Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074, China)

Abstract: The skill of a set of control and ensemble forecasts of Western Pacific Subtropical High was evaluated based on the 500 hPa geopotential height information from the THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE) datasets, which consist of model outputs from CMA, JMA, ECMWF, UKMO and NCEP. Three methods were adopted, i.e., Ensemble Mean (EMN), Bias-Removed Ensemble Mean

收稿日期: 2017-02-21; 修回日期: 2017-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(91437105), 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306024)资助。

作者简介: 颜妍, 女, 1992年生, 硕士生。研究方向: 多模式集成预报。E-mail: yany519@outlook.com

通讯作者: 周任君, 博士/副教授。E-mail: zrzj@ustc.edu.cn

(BREM) and running Training Period Superensemble (R_SUP), to integrate the data from different sources, and the metrics for performance evaluation include Talagrand distribution, correlation coefficient, Root Mean Square Error (RMSE), and Brier Skill Score (BSS). A comparison of the outputs of these models shows significant variation in forecast performance. The results indicate that the UKMO model has the best forecast skill for the 500 hPa geopotential height among all control forecasts, while the ECMWF model ranks on the top of all ensemble forecasts. From the improvement of RMSE, both BREM and R_SUP can significantly reduce the RMSE of the integrated forecast results compared to the original control forecasts in TIGGE, but EMN does not show similar improvement. However, none of the three integration methods shows discernable improvement of ensemble forecast of the 500 hPa geopotential height, with all having less skills than ECMWF single model ensemble forecast.

Key words: TIGGE; WPSH; multi-model ensemble; forecast

0 引言

在南北半球的副热带地区,存在着副热带高压带,由于海陆的影响,常断裂成若干个高压单体,这些单体统称为副热带高压.在北半球,它主要出现在太平洋、印度洋、大西洋和北非大陆上.出现在西北太平洋上的副热带高压称为西太平洋高压(下文简称副高),其西部的高压脊早夏季可伸入我国大陆,对我国夏季降水和台风活动有重要影响^[1].

早在上世纪,人们就开始了西太副高的大量研究.经过多年的研究,我们现在对副高已经有了深层次的认识.黄土松等^[2]详细研究了高压脊位置、温湿场分布、风场、涡度散度场、垂直运动及经圈环流等,指出了副热带高压受到动力因子以及热力因子的影响,结构非常复杂,各个单体之间以及高压单体内部都存在差异.Fujita 等^[3]研究发现东北太平洋上赤道反气旋的形成、发展、西移可使副高脊南落.Sadler 等^[4]指出南海及西太平洋缓冲带上形成的一系列反气旋将会导致西太平洋副高西伸加强.陶诗言等^[5]分析了夏季亚洲南部 100 hPa 环流特征,发现 100 hPa 流型表现为两类;第一类表现为反气旋偏离青藏高原上空,第二类表现为反气旋返回高原上空.当发生第一类流型时,西太副高西伸北进;而发生第二类流型时,西太副高向东南撤退.陶诗言等^[6]研究了副高的季节变化,指出从冬到夏副高存在两次北跳,与中国夏季雨带位置密切相关.Huang 等^[7]研究指出,当热带西太平洋变暖时,西太副高异常向北移动,中国长江和淮河流域夏季季风降水减少.He 等^[8]总结了近 10 年来副高的研究概况,指出提高副高的可预测性有利于提高东亚夏季降水异常的预测能力.Matsumura 等^[9]指出太平洋年代际振荡(PDO)会通过副热带急流的经向位移来影响西

太副高的长期变化.

西太副高与我国天气关系密切,影响我国大部分地区的温度与降水^[10-14],所以副高形状和位置的中长期预测也变得极其重要,精确的副高预报有利于提高汛期降水和夏季高温期温度的预报水平.副高的预测研究主要有数理统计方法和数值模式动力学方法^[15-18].用数值模式方法发展的预测西太副高的产品包含相应的误差^[19],而数理统计方法可以利用历史数据而且计算简单.然而,统计方法也有一些固有的缺陷,以神经网络为例,很难客观确定隐层神经元的数量和训练过程以达到局部最优,这会限制预报精确性^[20].多年来,许多学者将多模式集成预报应用到 ENSO、台风、气温、降水等领域,并取得了较好的研究成果^[21-27].目前,集成预报在副高预测上的应用较少.本文将采用多模式集成平均、消除偏差集成平均、滑动训练期超级集合 3 种集成方法,比较 3 种集成方法及单模式对副高的 1~15 天预报时效的预报效果.

1 资料与方法

1.1 资料

(1) TIGGE 资料: TIGGE^[28] 是全球交互式大集合 (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble) 的简称,是 THORPEX 项目的主要组成部分,该全球性研究项目旨在提高 1~15 天内的天气预报.目前共有中国气象局(CMA)、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和美国国家大气研究中心(NCAR)3 个 TIGGE 集合预报产品数据中心,这 3 个中心收集来自全球 10 个数值预报中心的集合预报数据集. TIGGE 资料为科学研究提供了便利.本文用来自 TIGGE 计划的 CMA, JMA (日本气象厅), ECMWF, UKMO (英国气象局), NCEP (美国

国家环境预报中心)等中心控制预报和集合预报数据,预报期为从 2011 年夏季到 2014 夏季(6~8 月,共 368 天),集合成员分别为 15,51,51,24,21,其中各中心包含 1 个控制预报成员.起报时间为每天 12:00 时(世界时),包含 500 hPa 位势高度场数据,纬向风场数据,预报时间间隔为 24 h,预报时效为 1~15 天,分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$.

(II) NCEP/NCAR 再分析资料:观测数据采用 NCEP/NCAR 的逐日 12:00 观测资料,包括 500 hPa 位势高度场、纬向风场,时间从 2011 年夏季到 2014 年夏季 6~8 月,分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$.

(III) 探空资料:采用 University of Wyoming (美国怀俄明大学)探空实测资料^[29].选取 47909 站(129.55E,28.38N)2011~2014 夏季的 500 hPa 位势高度场数据.

1.2 研究方法

(I) 预报效果检验方法

本文采用 Talagrand 分布^[30]、相关系数(R)、均方根误差(RMSE)、Brier 技巧评分(BSS)^[31]对预报效果进行检验评估.

Talagrand 分布:Talagrand 认为,一个好的集合预报系统,实况值落在每个集合成员之间的概率应该是相等的,即每个预报成员以相同的概率发生.具体方法为^[32]:假设有 K 个集合成员,按非降序排列后有 $K+1$ 个区间,用实况值落在每个区间的时空累积频率来描述预报系统的可靠性.对于某个区域(格点数为 P)有 K 个集合成员的 T 次集合预报结果,样本数为 $N = P \times T$,在第 j ($j=1,2,\dots,K+1$)个区间内,实况值落在该区间的频数为 F_j ,其期望值为 $N / (K+1)$,而实际值为 $P_j = F_j / N$.Talagrand 分布直方图的形态可以直观反映集合预报系统的可靠性.对于理想的集合预报系统,实况落在每个区间的概率相同,即 Talagrand 分布应该是平直的.如果分布为“L”型,则实况大多落在集合预报的小值区,说明集合预报系统有正偏差,反之表明集合预报系统有负的偏差.如果是“U”型分布,则表明实况大多落在集合预报的两边,说明集合预报系统的离散度不够大,反之则说明实况落在集合预报的中间区域,说明集合系统离散度大.

Brier 技巧评分^[27]:Brier 定义了一种均方概率误差,称为 Brier 评分(简称 BS).

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - O_i)^2 \quad (1)$$

式中, N 为二分类事件的预报数; f_i 为事件发生的

预报概率, O_i 为观测概率,如果事件发生则为 1,不发生时为 0.本文取位势高度大于或等于 588dagpm 为事件发生.BS=0 表示预报概率最佳.经常用到的是 Brier 技巧评分(简称 BSS),BSS 评分是在 BS 评分基础上定义的预报场预报概率和观测场预报概率之间的比较,表达式为^[33-34]

$$BSS = 1 - BS/BS_{\text{clim}} \quad (2)$$

式中, BS_{clim} 为气候评分. $BS_{\text{clim}} = \bar{O}(1 - \bar{O})$, \bar{O} 事件发生的气候频率为

$$\bar{O} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i \quad (3)$$

$BSS > 0$, 预报才有意义, $BSS = 1$ 表示预报最佳.

(II) 集成方法

本文采用 3 种集成方法:多模式集成平均(EMN)、消除偏差集成平均(BREM)、滑动训练期超级集合(R_SUP)^[35].

多模式集成平均的公式如下:

$$F_{\text{EMN}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \quad (4)$$

消除偏差集成平均公式如下:

$$F_{\text{BREM}} = \bar{O} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F}_i) \quad (5)$$

式中, F_i 为第 i 个模式的预报值; \bar{F}_i 为第 i 个模式预报值在训练期的平均; \bar{O} 为观测值在训练期的平均; N 为参与集成的模式数.

超级集合方法^[36]将时间序列分为训练期和预报期,在训练期确定参与集成的各模式的权重 a_i .超级集合方法的公式如下:

$$F_{\text{R_SUP}} = \bar{O} + \sum_{i=1}^N a_i (F_i - \bar{F}_i) \quad (6)$$

$$a_i = E_i / \sum_{i=1}^N E_i \quad (7)$$

权重 a_i 由各模式训练期均方根误差的倒数确定,也可采用线性回归^[24]、人工神经网络方法^[27]以及卡尔曼滤波^[37]等方法来确定.本文采用滑动训练期.在对训练期进行调试的过程中,发现随着训练期延长,滑动训练期超级集合预报的均方根误差随之减小,当训练期为 15 天时,均方根误差趋于平稳,所以选择 15 天为训练期,每次只对训练期临近的一天进行预报.

2 TIGGE 资料对副高预测的效果检验

2.1 各模式对副高预测的效果检验

本研究所关注的副高指西北太平洋 500 hPa 位

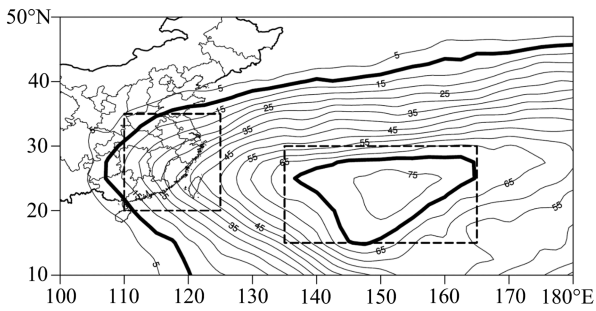


图 1 2011~2014 年夏季西太副高平均活动天数
Fig.1 Average active days of Western Pacific Subtropical High for summer time of 2011~2014

势高度场上 588dagpm 等值线所包围的区域.图 1 给出了 2011~2014 年夏季西太副高平均活跃天数,即每年夏季 500 hPa 位势高度场大于等于 588dagpm 的平均天数,数据为 NCEP/NCAR 观测值,左边黑色粗实线表示活动天数大于 10 天的区域,左边的虚线框表示“影响中国的主要区域,右边的虚线框表示副高活动高频区域.可以看到,西太副高的主要活动区域位于 110°E 以东到 180°E,10°N 以

北到 50°N,活动天数最多的关键区域(右边黑色粗实线)主要位于 135°E~165°E,15°N~30°N.西伸脊点会影响到我国东部,中国区域的平均活跃天数最大值从东部海岸线逐渐向内陆递减,影响我国的主要区域位于 20°N~35°N,110°E~125°E.本文对西太副高的预测检验主要在 10°N~50°N,110°E~180°E 区域.

图 2 给出了 5 个集合预报系统 500 hPa 位势高度场 7 天预报时效的 Talagrand 分布,其中 Ideal (实线)表示理想概率,而 Reality(柱状)则表示实际概率.由图可知,CMA,ECMWF 两个系统的总体 Talagrand 分布都呈现反“L”型,即实况落在最大预报值区间的概率比较大,表明系统对 500 hPa 位势高度场的预报都存在偏低现象.而 ECMWF,UKMO,NCEP 都呈现“U 型分布”,说明集合预报系统离散度偏小.这是目前集合预报普遍存在的问题,相对而言,ECMWF 集合系统更接近理想值,说明 ECMWF 集合预报系统更可靠.

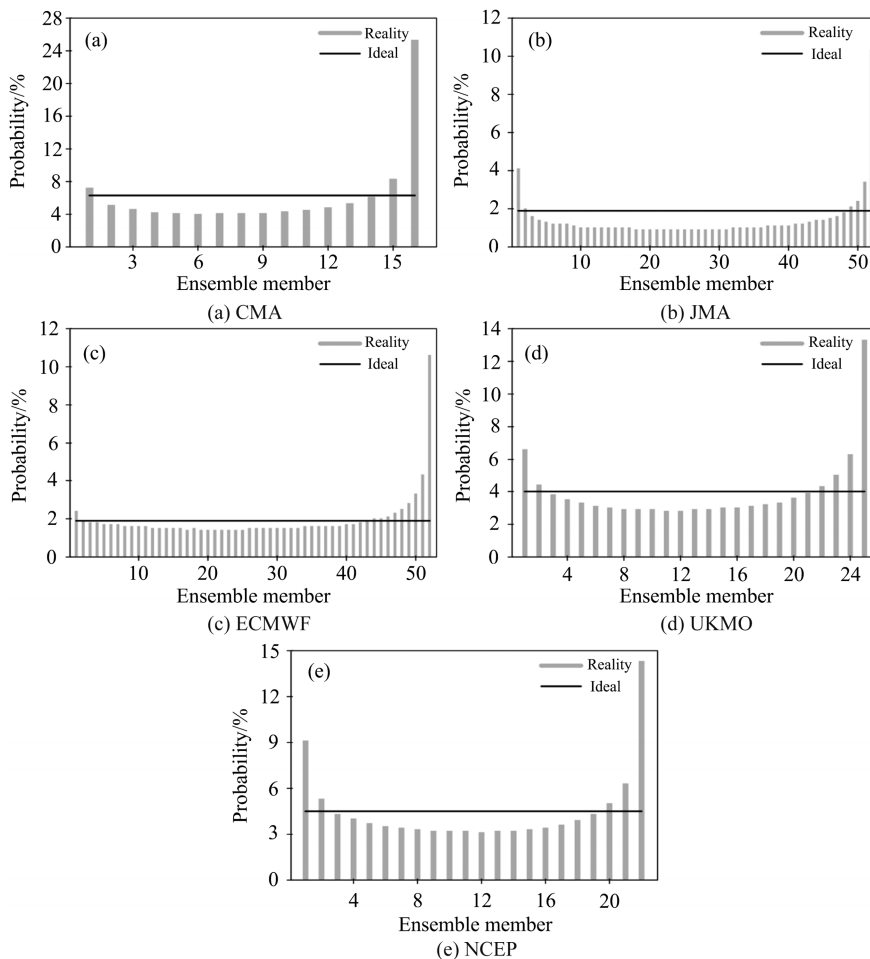


图 2 500 hPa 位势高度场的 Talagrand 分布

Fig.2 Talagrand distribution of 500 hPa geopotential height field

图 3 为 NCEP/NCAR 500 hPa 位势高度场与 TIGGE 各模式预测的 500 hPa 位势高度场的相关系数 R 的检验结果,图 3(a)和(b)分别为 TIGGE 各模式控制预报和集合预报.从 500 hPa 位势高度场的检验结果可知,随着预报时效的增加,预报的效果越差,相关系数减小,其中对 500 hPa 位势高度场控制预报和集合预报效果最好的都是 ECMWF,而预报效果与其他模式差距比较明显的是 CMA.由于 CMA 和 JMA 的时效分别为 9 天、10 天,较长预报时效的预报无法用 CMA 和 JMA 实现.如果以相关系数大于等于 0.6 为预报极限^[38-40],那么对于控制预报而言,JMA,ECMWF,UKMO 以及 NCEP 预

报最长时效能达到 8 天,而 CMA 为 7 天.对于集合预报而言,ECMWF 最长预报时效为 11 天,相比控制预报延长了 3 天,这说明,ECMWF 集合预报比控制预报具有更长的预报期限.而 UKMO 集合预报最长预报时效为 10 天,相比控制预报的 8 天,也延长了 2 天.JMA 和 NCEP 集合预报最长时效为 9 天,比控制预报延长了 1 天.而 CMA 集合预报时效也比控制预报时效延长了 1 天,为 8 天.从相关系数检验可知,集合预报比控制预报效果更好,集合预报最长预报时效比控制预报增加了 1~3 天.而控制预报和集合预报表现最好的都是 ECMWF,其次是 UKMO,JMA,NCEP,CMA.

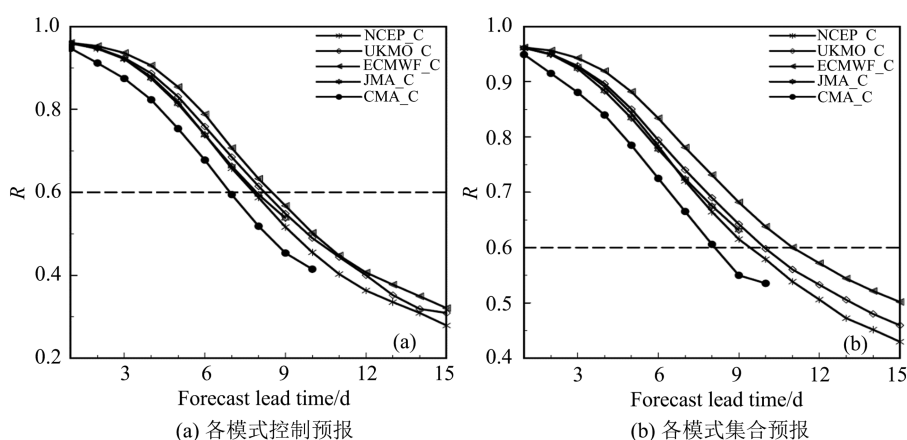


图 3 2011~2014 年夏季 500 hPa 位势高度场预报的相关系数检验分析

Fig.3 The correlation coefficient of the forecast of 500 hPa geopotential height for summer time during 2011~2014

图 4 为各模式控制预报的均方根误差 RMSE 的检验结果,可以看到各模式预报效果与相关系数预报效果基本类似.随着预报时效的增加,各模式均方根误差随之变大,但都在 10dagpm 以内.从控制预报可知,在 6 天预报时效之前,ECMWF 均方根误差最小,表现最佳,而从第 7 天开始,UKMO 检验结

果好于 ECMWF,所以控制预报在 6 天预报时效以内均方根误差检验排序为 ECMWF,UKMO,NCEP,JMA,CMA,而 7 天及以后均方根误差排序为 UKMO,ECMWF,NCEP,JMA,CMA.从集合预报可以看到,ECMWF 表现最佳,均方根误差最小,其次是 UKMO,NCEP,JMA,CMA.

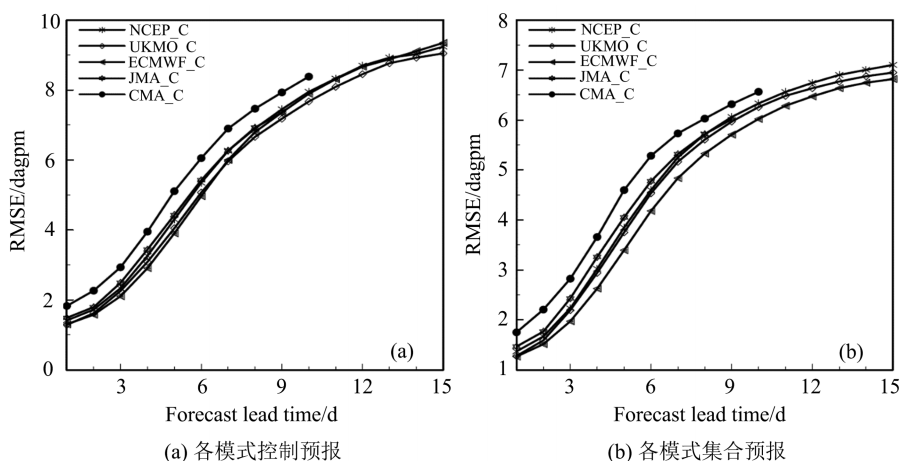
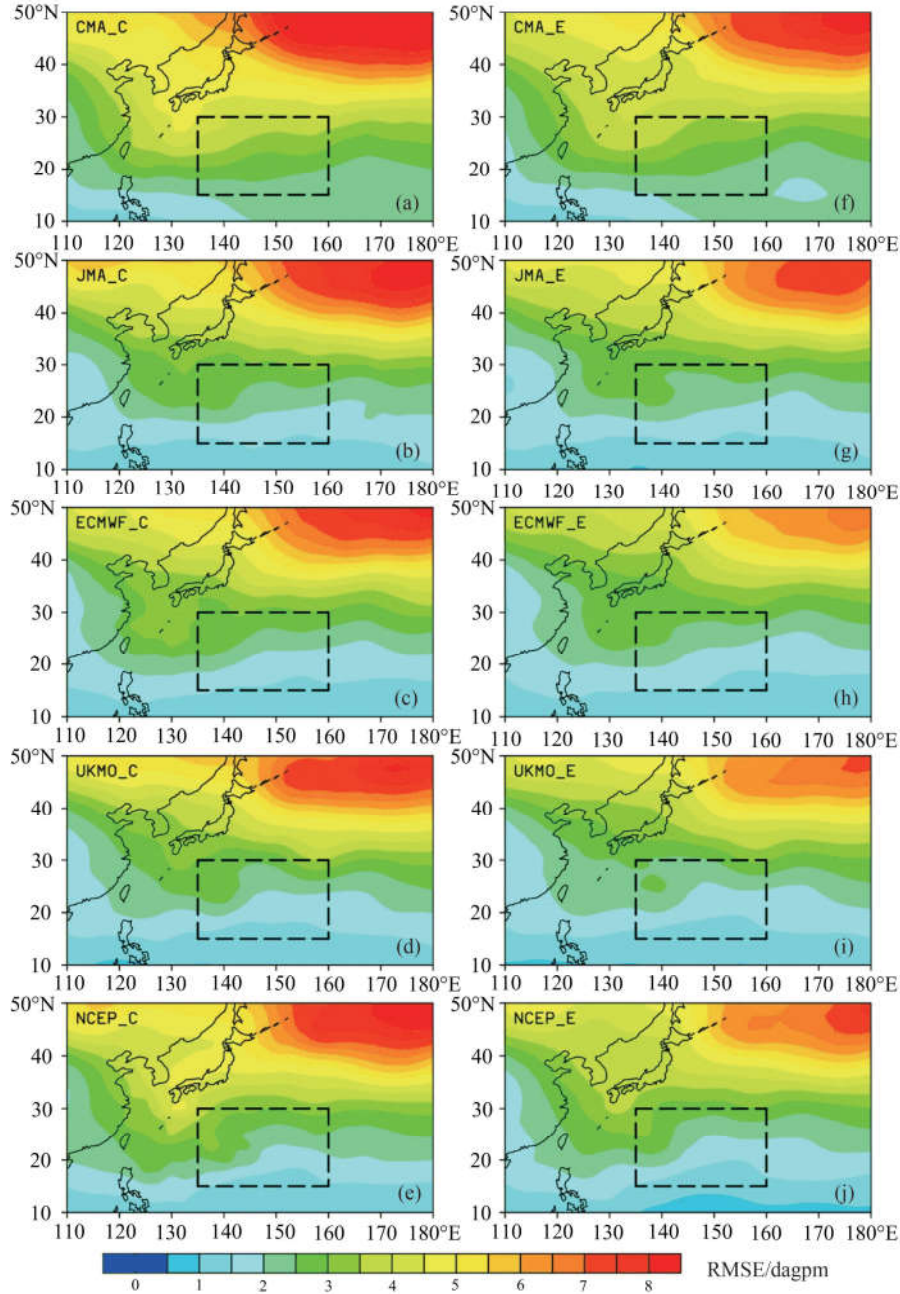


图 4 2011~2014 年夏季 500 hPa 位势高度场预报的均方根误差检验分析

Fig.4 The RMSE of the forecast of 500 hPa geopotential height for summer time during 2011~2014

图 5 为各模式均方根误差检验的空间分布,可以看到各模式控制预报和集合预报的均方根误差地理分布是相似的,都是从低纬到高纬递增,表明各模

式对低纬的 500 hPa 位势高度场的预测效果比高纬度更好,而各模式集合预报的均方根误差比控制预报更小,表明集合预报具有更好的预报效果.



(a)~(e)为控制预报,(f)~(j)为集合预报

图 5 TIGGE 中心各模式对 2011~2014 年夏季 500 hPa 位势高度场预报的均方根误差空间分布(预报时效为 7 天)

Fig.5 The spatial distribution of RMSE of the 500 hPa geopotential height forecast for summer time during 2011~2014 (7-day forecast)

Brier 技巧评分是针对二态分类事件的评分,本文给定 500 hPa 位势高度场的计算阈值为 588dagpm,即位势高度大于等于 588dagpm 的时候为事件发生,观测概率为 1,否则为 0.图 6 给出了各模式 BSS 技巧评分.从控制预报可见,0~6 天预报

中,ECMWF 评分最高,预报效果最好,其次为 UKMO,NCEP,JMA,CMA.7~15 天的预报中,UKMO 预报效果最好,其次是 ECMWF,JMA,NCEP,CMA.而集合预报则显示,0~5 天预报中 ECMWF 评分最高,其次是 UKMO,NCEP,JMA,

CMA, 6 ~ 15 天预报中评分最高的仍然是 ECMWF, 其次是 UKMO, JMA, NCEP, CMA. 在整

个 BSS 评分中, 评分效果较差的是 CMA, 这与前文相关系数检验以及均方根误差检验结果一致.

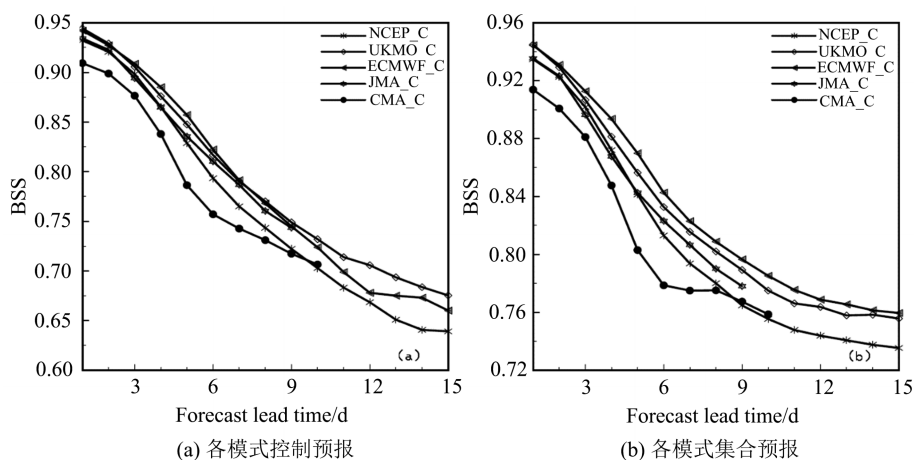


图 6 2011~2014 年夏季 500 hPa 位势高度场预报的 Brier 技巧评分

Fig.6 The Brier skill score of the forecast of 500 hPa geopotential height for summer time during 2011~2014.

2.3 TIGGE 资料预报技巧综合评估

为了更准确地评估 TIGGE 各模式资料对 500 hPa 位势高度场的预报效果, 这里将相关系数检验、均方根误差检验、Brier 技巧评分检验分别赋予相同的权重, 将各项指标内各模式预报效果排名从高到低依次赋予 5~1 分的分值, 最后将计算得出的 5 个模式预报的综合得分作为其预报能力的综合衡量指标, 各模式控制预报效果排名如表 1 所示. 从表 1 可见, 各模式对 500 hPa 位势高度场控制预报的效果从好到差排名分别为 UKMO, ECMWF, NCEP, JMA, CMA.

表 1 各模式控制预报综合评分

控制预报	CMA	JMA	ECMWF	UKMO	NCEP
R	1	3	5	4	2
RMSE	1	2	4	5	3
BSS	1	3	4	5	2
总得分	3	8	13	14	7
总排名	5	4	2	1	3

表 2 所示为各模式对 500 hPa 位势高度场集合预报的综合评分. 从表 2 可见, 各模式对 500 hPa 位势高度场集合预报的效果从好到差排名分别为 ECMWF, UKMO, JMA, NCEP, CMA.

2.3 探空资料与 TIGGE 资料对比

为了使结果更加可靠, 选取了来自怀俄明大学的探空实测资料中 47909 站点 2011~2014 年夏季

表 2 各模式集合预报综合评分

Tab.2 Integrated score of ensemble forecast of each model

控制预报	CMA	JMA	ECMWF	UKMO	NCEP
R	1	3	5	4	2
RMSE	1	2	5	4	3
BSS	1	3	5	4	2
总得分	3	8	15	12	7
总排名	5	3	1	2	4

的 500 hPa 位势高度场数据与 TIGGE 资料进行对比. 47909 位于奄美群岛, 是离副高高频发生区域最近的一个站点. 图 7 为 2011~2014 年夏季 (共 368 天) 47909 站点的探空资料实测的 500 hPa 位势高度场数据与 TIGGE 各模式控制预报 (图 7(a)) 和集合预报 (图 7(b)) 的泰勒图. 从图 7(a) 可知, CMA, JMA, ECMWF, UKMO, NCEP 各模式最长预报时效分别为 6, 7, 6, 9, 8 天, 而振幅与实况更接近的是 ECMWF, 但 UKMO 均方根误差更小, 综合评定认为各模式控制预报中 UKMO 预报效果最好. 从图 7(b) 可知, CMA, JMA, ECMWF, UKMO, NCEP 各模式集合预报最长预报时效分别为 6, 9, 11, 10, 8 天, 分别比控制预报延长了 0, 2, 5, 1, 0 天, 而振幅与实况更接近的是 ECMWF, ECMWF 均方根误差也较小, 因此集合预报中认为 ECMWF 预报效果最好.

3 多模式集成对副高预测的改进

3.1 多模式集成对副高预测的效果检验

图 8 给出了 3 种集成方法 1~15 天预报时效对

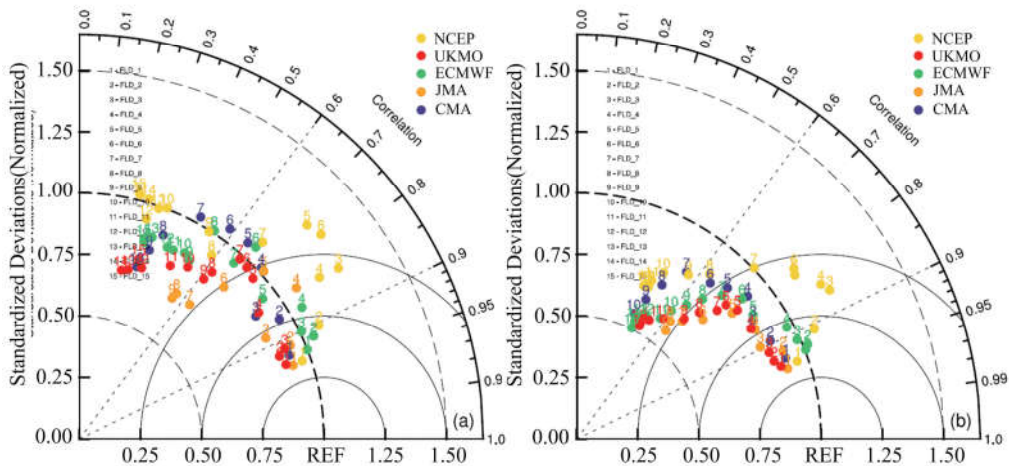


图 7 2011~2014 年夏季 TIGGE 各模式对 500 hPa 位势高度场控制预报(a)和集合预报(b)与实测探空资料的泰勒图
 Fig.7 The Taylor diagram showing the correlation between the control forecast(a) and ensemble forecast(b) of 500 hPa geopotential height from each model in TIGGE, and the observational sounding data for summer time during 2011~2014

500 hPa 位势高度场预报值与观测值的相关系数分析,图 8(a)为在各模式控制预报的基础上进行集成,图 8(b)则是在各模式集合预报的基础上进行集成,为了方便与单模式预报进行比较,这里分别选取了单模式控制预报效果较好的 UKMO 和集合预报效果较好的 ECMWF 与多模式集成进行比较.由图 8(a)可知,对于所有时刻的预报,3 种集成方法的预报效果都比单模式要好,而 BREM 集成方法和 R_SUP 集成方法对 500 hPa 位势高度场控制预报的改

善效果相当,EMN 在 9 天以内的预报与 BREM,R_SUP 效果相当,而在 10~15 天预报则不如 BREM 和 R_SUP.从可预报性来讲,3 种集成方法最长预报时效能达到 10 天,比单模式控制预报最好的 UKMO 延长了 2 天.从图 8(b)可见,基于各模式集合预报的 3 种集成方法对 500 hPa 位势高度场预报的改善效果不明显,甚至不如 ECMWF 单模式集合预报,但 3 种集成方法最长预报时效都能达到 11 天,比基于控制预报的 3 种集成方法的预报结果更好.

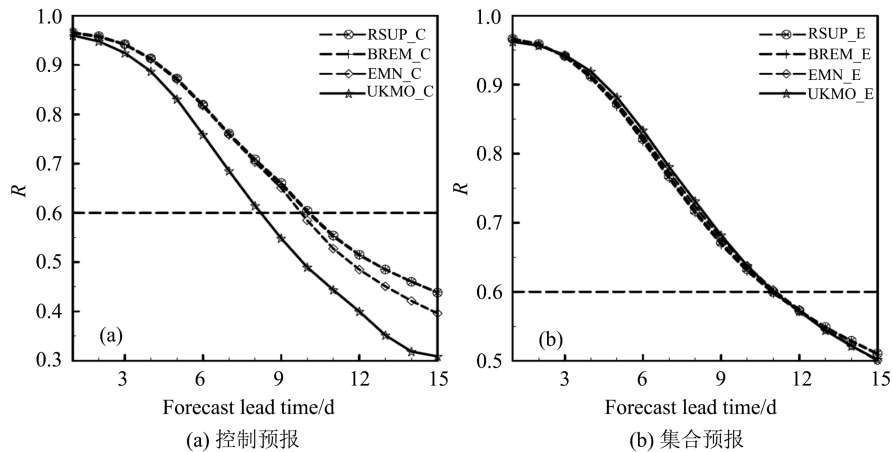


图 8 多模式集成对 2011~2014 年夏季 500 hPa 位势高度场预报的相关系数检验分析

Fig.8 The correlation coefficient of the multi-model forecast of 500 hPa geopotential height for summer time during 2011~2014

图 9 为基于各模式控制预报的 3 种集成方法对 500 hPa 位势高度场预报的均方根误差改进率,图 9 是在控制预报效果最好的 UKMO 基础上计算的改进百分比.从图 9 可见,3 种集成方法对预报效果有不同程度的改进,在 1~5 天预报时效内,R_SUP 改进效果最佳,其次是 BREM,而 EMN 则在 6~15 天

预报时效内效果更佳,比 R_SUP 和 BREM 都更好.

图 10 为基于各模式集合预报的 3 种集成方法对 500 hPa 位势高度场预报的均方根误差改进率,图 10 是在集合预报中均方根误差最小的 ECMWF 模式基础上计算的误差改进百分比.由图 10 可见,对于各模式集合预报,3 种集成方法对 500 hPa 位

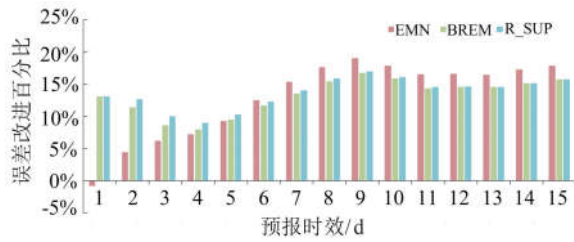


图 9 基于控制预报的多模式集成对 500 hPa 位势高度场预报的均方根误差改进率

Fig.9 The improvement of the RMSE of the integrated multi-model forecast of 500 hPa geopotential height, compared to the original single model based control forecast

势高度场预报的改进率不明显,在 1~3 天预报时效内 R_SUP 和 BREM 改进比较明显,而 4~15 天这两种集合方法不如 ECMWF 单中心集合预报,EMN 集合方法在 9~15 天预报时效内有略微改进。

由图 11(a)的 Brier 技巧评分检验可知,任何一种

集成方法的检验效果均比单模式要好,其中 R_SUP 的 BSS 检验效果最佳,BREM,EMN 紧跟其后,评分都高出 UKMO 单模式控制预报,而图 11(b)则显示 R_SUP 方法 BSS 评分最高,其次是 BREM,而 EMN 在某些预报时效则不如 ECMWF 单模式集合预报。



图 10 基于集合预报的多模式集成对 500 hPa 位势高度场预报的均方根误差改进率

Fig.10 The improvement of the RMSE of the integrated multi-model forecast of 500 hPa geopotential height, compared to the original single model based ensemble forecast

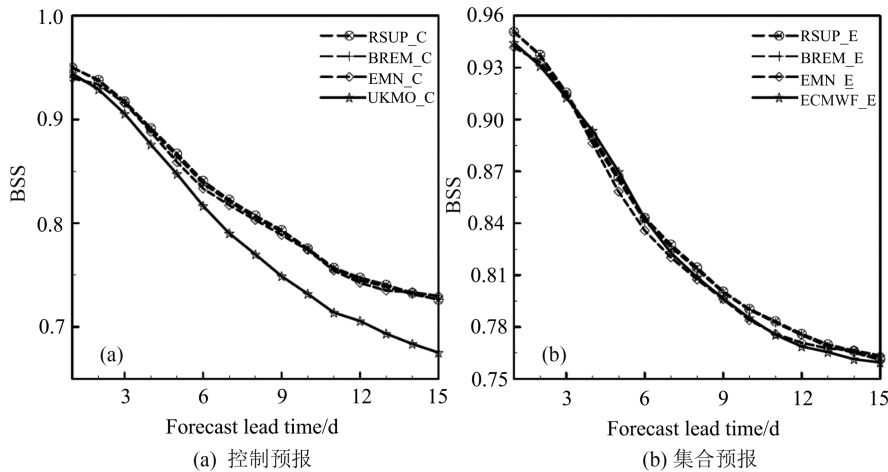


图 11 多模式集成对 2011~2014 年夏季 500 hPa 位势高度场预报的 Brier 技巧评分检验分析

Fig.11 The Brier skill score of the multi-model forecast of 500 hPa geopotential height for summer time during 2011~2014

3.2 多模式集成预报技巧综合评估

为了评估基于控制预报的多模式集成对副高的预报效果,这里将相关系数检验、均方根误差改进率、Brier 技巧评分检验分别赋予相同的权重,将各项指标内各集成方法以及 UKMO 控制预报的预报效果从高到低依次赋予 4~1 分的分值,最后将计算得出的 3 个集成方法综合得分作为其预报能力的综合衡量指标,各项排名如表 3 所示,从表 3 可见,效果从好到差的排名分别为 R_SUP, BREM, EMN, UKMO.

表 3 基于控制预报的多模式集成综合评分

Tab.3 Integrated score of multi-model ensemble forecast (based on control forecast of each model)

控制预报	EMN	BREM	R_SUP	UKMO 单模式
R	1	3	4	2
RMSE	4	2	3	1
BSS	2	3	4	1
总得分	7	8	10	4
总排名	3	2	1	4

表 4 所示为基于集合预报的三种集成方法及 ECMWF 单模式对 500 hPa 位势高度场预报的综合评分,从表 4 可见,预报效果从好到差的排名分别为

ECMWF 最佳,其次是 R_SUP 和 EMN 并列,然后是 BREM.

表 4 基于集合预报的多模式集成综合评分

Tab.4 Integrated score of multi-model ensemble forecast
(based on ensemble forecast of each model)

集合预报	EMN	BREM	R_SUP	ECMWF 单模式
R	3	1	2	4
RMSE	4	1	2	3
BSS	1	3	4	2
总得分	8	5	8	9
总排名	2	3	2	1

4 结论

本文对 CMA, JMA, ECMWF, UKMO 以及 NCEP 5 个预报中心 2011~2014 夏季副高的预报效果进行了评估,并利用多模式集成平均、消除偏差集成平均和滑动训练期超级集合进行多模式集成预报试验,比较 3 种集成方法的预报效果,得到以下结论:

(I) 比较各模式控制预报和集合预报的相关系数检验、均方根误差检验以及 Brier 技巧评分等可以发现,各模式集合预报评分比其控制预报评分更高,所以在单个模式控制预报和集合预报中以集合预报为更佳选择。

(II) TIGGE 中心 5 个模式对副高控制预报的综合得分排名如下: UKMO, ECMWF, NCEP, JMA, CMA. 即表明在各模式对副高控制预报中选择,以 UKMO 为最佳模式预报. 而各模式对副高集合预报的优劣排名为: ECMWF, UKMO, JMA, NCEP, CMA. 即表明在各模式对副高集合预报中选择,以 ECMWF 为最佳模式预报。

(III) 探空实测资料与 TIGGE 资料的对比表明,对 47909 站点 500 hPa 位势高度场的控制预报中, UKMO 模式预报效果最好,而各模式集合预报中则是 ECMWF 预报效果较好,这与用 NCEP/NCAR 作为观测资料的结果一致。

(IV) 基于单模式控制预报的 3 种集成方法对副高预报有较好的改进效果,其中改进效果最大的是 R_SUP,其次是 BREM, EMN, 这 3 种集成方法都比控制预报综合评分最高的 UKMO 更好. 基于集合预报的 3 种集成方法对副高预报的改进效果不明显,综合评分略低于 ECMWF 单模式集合预报。

综上所述,在利用 TIGGE 数据做副高预报时,简单易行且效果最优的是 ECMWF 单模式集合预报. 而采用多模式集成预报时,以 R_SUP 为最佳方法。

参考文献 (References)

- [1] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 4 版. 北京: 气象出版社, 2007: 475-484.
- [2] 黄土松, 余志豪. 副热带高压结构及其同大气环流有关若干问题的研究[J]. 气象学报, 1962, 31(4): 339-359.
- [3] FUJITA T T, WATANABE K, IZAWA T. Formation and structure of equatorial anticyclones caused by large-scale cross-equatorial flows determined by ATS-I photographs [J]. Journal of Applied Meteorology, 1969, 8(4): 649-667.
- [4] SADLER J C, BRETT W R, HARRIS B E, et al. Forecasting minimum cloudiness over the Red River Delta during the summer monsoon [R]. Honolulu: Hawaii Institute of Geophysics, 1968.
- [5] 陶诗言, 朱福康. 夏季亚洲南部 100 毫巴流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系[J]. 气象学报, 1964, 34(4): 385-396.
- [6] 陶诗言, 王作述, 朱福康. 中国夏季副热带天气系统若干问题的研究[M]. 北京: 科学出版社, 1963.
- [7] HUANG R, CHEN J, WANG L, et al. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2012, 29(5): 910-942.
- [8] HE C, ZHOU T, WU B. The key oceanic regions responsible for the interannual variability of the western North Pacific subtropical high and associated mechanisms[J]. Journal of Meteorological Research, 2015, 29(4): 562-575.
- [9] MATSUMURA S, HORINOUCHE T. Pacific Ocean decadal forcing of long-term changes in the western Pacific subtropical high[J]. Scientific Reports, 2016 (6): 37765.
- [10] 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 副热带高压形成和变异的动力学问题[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 312.
- [11] HE Jinhai, ZHOU Bing, WEN Min, et al. Vertical circulation structure, interannual variation features and variation mechanism of western Pacific subtropical high [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2001, 18(4): 497-510.
- [12] 赵声蓉, 宋正山. 华北汛期旱涝与中高纬大气环流异常[J]. 高原气象, 1999, 18(4): 535-540.
- [13] 韦道明, 李崇银, 谭言科. 夏季西太平洋副热带高压南

- 北位置变动特征及其影响[J]. 气候与环境研究, 2011, 16(3): 255-272.
- [14] 任广成, 吴小林, 李旺. 盛夏副高脊线异常变化对我国气温影响及海气背景分析[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(3): 1-5.
- [15] 张韧. 基于前传式网络逼近的太平洋副热带高压活动的诊断预测[J]. 大气科学, 2001, 25(5): 650-660.
- [16] 刘科峰, 张韧, 洪梅, 等. 基于最小二乘支持向量机的副热带高压预测模型[J]. 应用气象学报, 2009, 20(3): 354.
- [17] 杨杰, 封国林, 赵俊虎, 等. 夏季西太平洋副热带高压的客观定量化预测及其对汛期降水的指示[J]. 气象学报, 2012, 70(5): 1032.
- [18] 贾亚俊, 胡轶佳, 钟中, 等. 夏季西太平洋副热带高压指数的统计预测模型[J]. 高原气象, 2015 (5): 1369-1378.
- [19] SUI C H, CHUNG P H, LI T. Interannual and interdecadal variability of the summertime western North Pacific subtropical high [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(11): 93-104.
- [20] LU R, DING H, RYU C S, et al. Midlatitude westward propagating disturbances preceding intraseasonal oscillations of convection over the subtropical western North Pacific during summer[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(21): 393-407.
- [21] ZHANG Z, KRISHNAMURTI T N. Ensemble forecasting of hurricane tracks [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78 (12): 2785-2795.
- [22] 郑飞. ENSO 集合预报研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(大气物理研究所), 2007.
- [23] 周文友, 智协飞. 2009 年夏季西太平洋台风路径和强度的多模式集成预报 [J]. 气象科学, 2012, 32 (5): 492-499.
- [24] 林春泽, 智协飞, 韩艳, 等. 基于 TIGGE 资料的地面气温多模式超级集合预报[J]. 应用气象学报, 2009, 20(6): 706-712.
- [25] ZHI X, QI H, BAI Y, et al. A comparison of three kinds of multimodel ensemble forecast techniques based on the TIGGE data [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 26: 41-51.
- [26] 崔慧慧, 智协飞. 基于 TIGGE 资料的地面气温延伸期多模式集成预报[J]. 大气科学学报, 2013, 36(2): 165-173.
- [27] 智协飞, 季晓东, 张璟, 等. 基于 TIGGE 资料的地面气温和降水的多模式集成预报[J]. 大气科学学报, 2013, 36(3): 257-266.
- [28] RICHARDSON D, BUIZZA R, HAGEDORN R. Final report of the 1st Workshop on the THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE) [R]. World Meteorological Organization WMO/TD, 2005.
- [29] Sounding data[DB/OL].[2017-01-20]. <http://weather.uwyo.edu/upperair/seasia.html>
- [30] TALAGRAND O, VAUTARD R, STRAUSS B. Evaluation of probabilistic prediction systems [C]// Proceedings of ECMWF Workshop on Predictability, 1997, 1: 25.
- [31] BRIER G W. Verification of forecasts expressed in terms of probability [J]. Monthly Weather Review, 1950, 78(1): 1-3.
- [32] 李莉, 李应林, 田华, 等. T213 全球集合预报系统性误差订正研究[J]. 气象, 2011, 37(1): 31-38.
- [33] HAMILL T M, DENTREMONT R P, BUNTIN J T. A description of the air force real-time nephanalysis model [J]. Weather and Forecasting, 1992, 7 (2): 288-306.
- [34] HAMILL T M, WHITAKER J S, SNYDER C. Distance-dependent filtering of background error covariance estimates in an ensemble Kalman filter [J]. Monthly Weather Review, 2001, 129(11): 2776-2790.
- [35] CARTWRIGHT T J, KRISHNAMURTI T N. Warm season mesoscale superensemble precipitation forecasts in the southeastern United States [J]. Weather and Forecasting, 2007, 22(4): 873-886.
- [36] KRISHNAMURTI T N, KISHTAWAL C M, ZHANG Z, et al. Multimodel ensemble forecasts for weather and seasonal climate [J]. Journal of Climate, 2000, 13(23): 4196-4216.
- [37] HE C, ZHI X, YOU Q, et al. Multi-model ensemble forecasts of tropical cyclones in 2010 and 2011 based on the Kalman Filter method [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2015, 127(4): 467-479.
- [38] MURPHY A H, EPSTEIN E S. Skill scores and correlation coefficients in model verification [J]. Monthly Weather Review, 1989, 117(3): 572-582.
- [39] NIU R, ZHAI P. Synoptic verification of medium-extended-range forecasts of the Northwest Pacific subtropical high and South Asian high based on multi-center TIGGE data [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 27(5): 725-741.
- [40] NIU R, ZHAI P, ZHOU B. Evaluation of forecast performance of Asian summer monsoon low-level winds using the TIGGE dataset [J]. Weather and Forecasting, 2015, 30(2): 455-470.