

董海萍,张秀丽,郭卫东,等. 2010 年 8 月环流形势的多模式超级集合预报. 应用气象学报,2013,24(5):606-616.

## 2010 年 8 月环流形势的多模式超级集合预报

董海萍\* 张秀丽 郭卫东 闫 炎

(空军气象中心,北京 100843)

### 摘 要

利用多模式超级集合预报法,以欧洲中期天气预报中心、日本气象厅、德国气象局、中国气象局和中国空军气象中心共 5 个决定性 7 d 预报产品为集成员,对 2010 年 8 月 500 hPa 高度场和 850 hPa 温度场分别进行固定训练期和滑动训练期超级集合预报。采用均方根误差和相关系数对超级集合预报、单一模式预报和简单集合平均预报进行对比检验,同时对各预报结果的均方根误差空间分布进行对比分析。结果表明:超级集合预报在所有预报结果中最佳,且滑动集合预报对 8 月后期时段预报要略好于固定集合预报,两者预报效果均好于参与集合预报的各模式,也优于集合平均预报。但随着预报时效的延长,集合平均预报的优势也随之提升。从预报结果均方根误差的空间分布可知,多模式超级集合预报相比于单一模式预报效果提高的区域,500 hPa 位势高度场主要位于印度半岛、印度洋、青藏高原及以西地区,而 850 hPa 温度场则主要位于蒙古、青藏高原、中国新疆及以西地区。

**关键词:** 超级集合预报; 2010 年 8 月环流形势; 对比检验

### 引 言

由于大气环境的混沌特性<sup>[1]</sup>, Epstein<sup>[2]</sup> 和 Leith<sup>[3]</sup> 首先基于蒙特卡罗统计试验法从大气运动的随机性角度提出了集合预报。现经过几十年的发展,集合预报已进入实际业务应用的成熟阶段,在当今的数值天气预报中的地位也越来越重要,成为了国际上公认的、最具有发展前途的、解决单一确定性数值预报的不确定性问题的随机动力理论和方法。集合预报按不确定性来源划分可分为初值集合、物理集合和多模式集合。对于数值预报初始场的不确定性与模式物理过程的不确定性现已有较多研究<sup>[4-10]</sup>,而对于多模式集合预报的研究还相对较少。随着计算机技术和气象数值模式的飞速发展,世界各地不同的数值预报产品越来越丰富。近年来,世界气象组织(WMO)发起的 THORPEX 科学计划中的 TIGGE 计划提出了建立全球交互式大集合预报。中国气象局、欧洲中期天气预报中心和美国国家大气研究中心作为 WMO 设立的 3 个 TIGGE 资料中心,每天接收数十个国家的集合预报产品。那

么,如何有效地利用各种数值预报产品为气象保障服务就成为目前所面临的亟待解决的问题。

Krishnamurti 等<sup>[11-12]</sup> 1999 年提出了超级集合预报方法,它将多个模式的数值预报结果进行处理加工,从而获得最优预报。研究表明<sup>[13-15]</sup>,超级集合预报可减少模式系统性误差,所提供的信息比单一模式集合预报更准确。利用该方法可以弥补初始场的不确切性和模式的不完善性,获得更佳的预报效果。在我国对于多模式集合预报技术的超级集合预报研究及其应用还处于起步阶段。如周兵等<sup>[16]</sup> 通过不同模式对目标区域预报能力的分析,应用神经网络法和客观多模式权重系数法,建立了集合预报方程,并应用于 2005 年汛期业务运行。陈丽娟等<sup>[17]</sup> 利用超级集合预报的思想对参加中国汛期降水预测的预报结果进行集成,结果表明:集合预报效果稳定,多数情况下优于单一成员预报。赵声蓉<sup>[18]</sup> 针对模式 2 m 温度建立温度集成预报系统,表明集成结果明显优于成员模式单独预报结果。智协飞等<sup>[19]</sup> 对北半球中纬度地区地面气温进行超级集合预报研究,并设计了滑动训练期的超级集合预报方案。陈超辉等<sup>[20]</sup> 分别采用相关加权、多元线性回

2012-08-23 收到, 2013-07-22 收到再改稿。

\* email: haiping\_dong@aliyun.com

归以及支持向量机回归方法进行超级集合预报研究。段明铨等<sup>[21]</sup>根据气候等概率区间大小和集合成员数,提出变权集合平均方法。林春泽等<sup>[22]</sup>基于 TIGGE 资料对世界上 4 个中心集合预报的地面气温场集合平均结果进行检验评估,表明超级集合与消除偏差集合平均降低了预报误差,预报效果优于最好的单一中心预报和简单集合平均。由此可见,多模式超级集合预报相对于提高模式分辨率或发展庞大的集合预报系统,其计算量较小,且可有效提高中短期预报准确率,具有一定的业务应用前景。因此,采用多模式集合预报是在现行模式、现行计算机资源条件下,获得最佳预报效果的有效方法,有必要在此方面作进一步的试验研究,并应用到气象业务服务中。

本文以中国空军气象中心全球谱模式 T511L60 和世界上几个主要业务中心在内的共 5 种决定性预报为集合预报成员,采用多模式超级集合预报法,对 2010 年 8 月(利用 6—7 月各模式预报结果建立模型,对 8 月进行超级集合预报)的 500 hPa 高度场和 850 hPa 温度场进行预报,并对超级集合预报结果与各模式原有预报结果和各模式集合平均预报进行了检验对比分析,以此对多模式超级集合预报效果进行总体评估,为天气预报业务提供使用参考。

## 1 多模式超级集合预报方法

超级集合预报方法一般采用建立多元线性回归模型方式,将时间序列分为训练和预报两个阶段。在训练阶段,对每个格点建立预报值与观测值或分析值的多元线性回归模型,通过使用超级集合预报值与观测值做多元线性回归分析,确定参与超级集合预报各个模式的回归(权重)系数,而相应的权重系数将用于预报期的超级集合预报<sup>[23]</sup>。

超级集合预报模型由式(1)构建。在某一个给定的格点上,对于某一预报时效某一气象要素:

$$S = \bar{O} + \sum_{i=1}^N a_i (F_i - \bar{F}_i). \quad (1)$$

式(1)中, $\bar{O}$ 是训练期的观测值平均, $a_i$ 是参与集合的第  $i$  个成员的权重系数, $F_i$  和  $\bar{F}_i$  分别是第  $i$  个模式的预报值与其在训练期的预报平均值, $N$  是参与超级集合预报的模式总数。其中权重系数  $a_i$  由训

练期式(2)中的误差项  $G$  的最小化计算获得<sup>[23]</sup>:

$$G = \sum_{i=1}^m (S'_i - O'_i). \quad (2)$$

式(2)中, $m$  是训练期时间样本数, $S'_i$  和  $O'_i$  分别是训练期的超级集合和观测场的偏差。在预报期,将在训练期得到的  $a_i$  代入式(1)中,对其他格点也同样计算,即可进行超级集合预报。

## 2 超级集合成员和试验方案

### 2.1 成员组成及资料

选取欧洲中期天气预报中心(ECMWF)(以下简称欧洲)、日本气象厅(JMA)(以下简称日本)、德国气象局(以下简称德国)、中国气象局(CMA)(以下简称中国)以及中国空军气象中心(以下简称中国空军)共 5 个决定性预报产品为超级集合预报成员,资料选用 2010 年夏季汛期 6—8 月共 92 d 预报产品,通过多模式超级集合预报技术,制作间隔 24 h 的 7 d 预报。由于得到的 5 个中心预报产品空间精度不一致(欧洲的为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ,日本的为  $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ ,德国的为  $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ ,中国的为  $1^\circ \times 1^\circ$ ,中国空军的为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ),因此,资料在经过 GRIB 码解码处理后,利用双线性插值将各预报产品统一成格距为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ,且预报区域范围定为东北半球( $0^\circ \sim 60^\circ \text{N}$ ,  $60^\circ \sim 177.5^\circ \text{E}$ )。由于 500 hPa 的环流形势可基本代表大气的整体环流状况,而 850 hPa 温度场可反映大气低层的热力状况,因此,这里选定多模式超级集合预报产品为 500 hPa 位势高度场和 850 hPa 温度场,建立回归模型和检验对比均采用 NCEP/NCAR 再分析资料。

### 2.2 对比试验方案

由于超级集合预报按时间序列分为训练和预报两个阶段,为此对于 2010 年夏季汛期 6—8 月,将分别采用固定训练期和滑动训练期两种方式来建立回归方程,确定参与集合各成员的回归(权重)系数,且该权重系数将用于预报期的超级集合预报。固定训练期是对 6 月 8 日—8 月 7 日的 61 d 各预报模式预报场对 NCAR 再分析资料进行训练,建立回归方程,以此回归方程对 8 月 8 日—8 月 31 日的 24 d 进行预报,权重系数随空间变化但不随时间变化,即对预报范围的每一格点都建立独立的预报方程。而滑

动训练期预报选取与预报日最接近的前 61 d 的各预报模式预报场对 NCEP/NCAR 再分析资料进行训练,建立回归方程,同样对 8 月 8—31 日进行预报,但每天所建回归方程的权重系数不同,即滑动训练期预报的各权重系数随时间和空间的不同而变化。

对比试验方案是将固定训练期确定权重系数的回归方程进行超级集合预报结果与滑动训练期确定权重系数的回归方程进行超级集合预报结果进行对比分析,同时与简单集合平均预报结果和参与集合的 5 个成员模式预报结果进行对比分析。预报要素为可基本代表大尺度环流形势的 500 hPa 位势高度场和低层 850 hPa 温度场,检验量以均方根误差和倾向相关系数为依据。

简单集合平均预报,即对所有的预报成员使用平均权重,取其算术平均作为最终的预报结果,即

$$F_{\text{emn}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (3)$$

式(3)中, $F_i$  为第  $i$  个模式的预报值, $n$  为参与集合的模式总数。

采用均方根误差和相关系数来检验集合预报效果。均方根误差越低说明模式的预报性能越好,而相关系数越大说明预报与分析场之间的变化趋势越吻合。均方根误差  $E_{\text{RMS}}$  和相关系数  $r$  计算如下:

$$E_{\text{RMS}} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (F_i - A_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

式(4)中, $F_i$  为预报值, $A_i$  为 NCEP/NCAR 再分析资料;

$$r = \frac{[\sum (F - M_{F_0})(A_V - M_{V_0})]}{[\sum (F - M_{F_0})^2 \sum (A_V - M_{V_0})^2]^{1/2}}, \quad (5)$$

式(5)中, $\sum$  表示对预报区域所有格点求和, $F$  为预报值, $A_V$  为 NCEP/NCAR 再分析资料, $M_{F_0}$  和  $M_{V_0}$  分别代表预报和分析的平均值。

### 3 预报结果检验

从前面的对比试验方案可知,使用固定训练期和滑动训练期两种方式进行集合预报的不同点是用于超级集合预报的各成员权重系数是否随时间变化。由于固定训练期的超级集合预报的权重系数随时间不变,这样随预报时效的延长,权重系数就有失

效的情况。那么,滑动训练期的超级集合预报是否可以改善固定训练期的预报效果,且这两种超级集合预报是否优于各模式预报结果及集合平均预报,还需作进一步对比分析。这里主要从模式预报的均方根误差和相关系数来进行对比分析。

#### 3.1 固定和滑动集合预报的逐日检验

##### 3.1.1 500 hPa 位势高度场逐日预报检验

为避免多种预报结果对比时线条过于混乱,这里先将参与集合预报的各成员预报结果进行对比分析,从中选取预报效果最好的成员预报结果,再与固定训练期超级集合预报、滑动训练期超级集合预报以及各模式的简单集合平均进行对比分析。图 1 为 5 个成员预报结果及其中最好的欧洲预报结果与简单集合平均、固定训练期和滑动训练期超级集合预报的 500 hPa 位势高度场的逐日均方根误差。从图 1a 中 5 个成员的 24, 72, 120 h 和 168 h 模式预报结果均方根误差可知,欧洲模式 24 h 和 72 h 500 hPa 位势高度场预报结果明显好于其他 4 种模式预报; 120 h 欧洲模式预报除个别时次与其他模式预报效果相当外,也处于明显的优势地位;而 168 h 欧洲模式预报虽没有明显优势,但也略好于其他模式预报。为此,选取欧洲模式预报结果与超级集合预报进行对比。从图 1b 的各预报结果的均方根误差可知, 24 h 预报滑动训练期的超级集合预报效果最好;在预报前期,即 8 月 8—15 日,滑动训练期和固定训练期超级集合预报效果基本一致,而 8 月 16 日后,滑动训练期的超级集合预报要好于固定训练期,其次是欧洲模式预报,集合平均预报最差;对于 72 h 预报,在预报前期即 8 月 8—14 日,滑动训练期也较固定训练期的超级集合预报效果好,其后,两者基本一致,欧洲模式预报总体要差于超级集合预报,但在某些时次,欧洲预报要略好于超级集合预报,简单集合平均预报还是最差;对于 120 h 预报,4 种预报结果相差不明显,且变化趋势基本一致,但总体上超级集合效果略好些,简单集合平均预报与欧洲模式预报效果相互交错,难分高低;对于 168 h 预报,简单集合平均预报与滑动训练期和固定训练期超级集合预报的均方根误差大小和变化趋势基本一致,但总体还是超级集合预报效果略好点,且 8 月 19 日后滑动超级集合预报结果更好一些,而欧洲模式预报结果误差起伏较大,总体预报效果不理想。

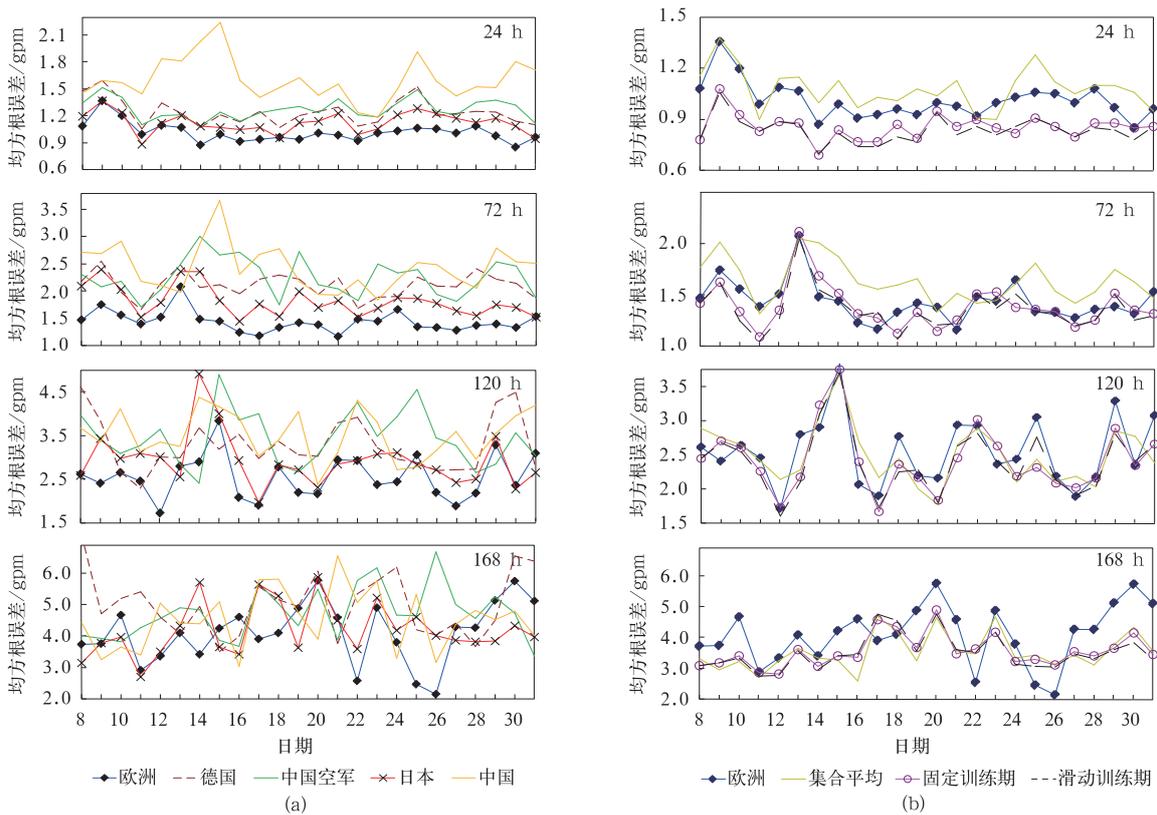


图 1 2010 年 8 月 5 个成员预报结果(a)及欧洲预报结果与集合平均、固定训练期和滑动训练期超级集合预报(b)的 500 hPa 位势高度场逐日均方根误差  
 Fig. 1 The RMSE of 500 hPa geopotential height daily forecast of five models(a) and ECMWF, the multi-model ensemble mean, unchanged superensemble, the changed superensemble(b) in August 2010

而从 5 个成员预报结果及其中最好的欧洲预报结果与简单集合平均、固定训练期和滑动训练期超级集合预报的 500 hPa 位势高度场的逐日相关系数可知(图 2),其预报结果与均方根误差检验结果基本一致。从图 2a 中 5 种成员的 24, 72, 120 h 和 168 h 模式预报结果的相关系数可看到,120 h 之前的欧洲模式 500 hPa 位势高度场预报结果明显好于其他 4 种模式预报;168 h 欧洲模式预报除个别时次与其他模式预报效果相当或略差外,总体也好于其他模式预报。由图 2b 的各预报结果的相关系数可知,对于 24 h 预报,滑动训练期和固定训练期超级集合预报效果基本一致,但某些时段的滑动训练期比固定训练期超级集合预报效果好;对于 72 h 预报,滑动训练期和固定训练期的超级集合预报基本一致,总体预报效果最好,其次是欧洲模式预报,简单集合平均预报最差;对于 120 h 预报,4 种预报结

果相差不明显,并且变化趋势基本一致,但欧洲模式预报效果最差;对于 168 h 预报,欧洲模式预报结果误差起伏较大,预报效果总体看最差。

由此可见,滑动训练期和固定训练期超级集合预报均表现出较好的预报能力,且 8 月后期时段预报的滑动集合预报略好于固定集合预报,两者预报效果均好于参与集合的各模式预报,也好于集合平均预报。并且随预报时效的延长,集合平均预报的优势提升,168 h 即第 7 天预报与滑动训练期和固定训练期超级集合预报效果接近。

### 3.1.2 850 hPa 温度场逐日预报检验

图 3 为 5 个成员预报结果及其中最好的日本预报结果与集合平均、固定训练期和滑动训练期超级集合预报的 850 hPa 温度场的逐日均方根误差。从图 3a 的 5 种成员的 24, 72, 120 h 和 168 h 模式预报结果的均方根误差可看到,日本模式的 24, 72 h 和

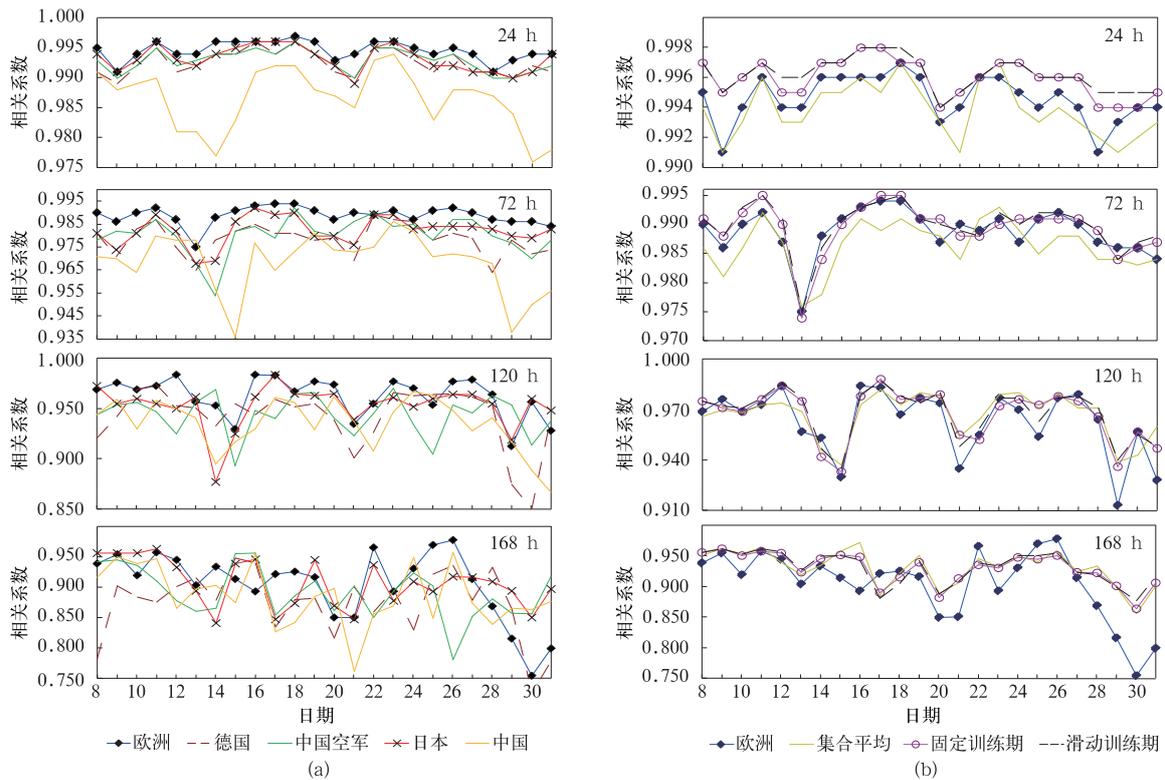


图2 2010年8月5个成员预报结果(a)及欧洲预报结果与集合平均、固定训练期和滑动训练期超级集合预报(b)的500 hPa位势高度场的逐日相关系数

Fig. 2 The correlation coefficients of 500 hPa geopotential height daily forecast about five models(a) and ECMWF, the multi-model ensemble mean, unchanged superensemble, the changed superensemble(b) in August 2010

120 h 的 850 hPa 温度场预报结果明显好于其他 4 种模式预报, 168 h 预报除个别时次外, 日本模式的 850 hPa 温度场预报也都明显好于其他模式预报。因此, 选取日本模式的 850 hPa 温度场预报结果与超级集合预报进行对比。从图 3b 的各预报结果的均方根误差可看到, 24, 72, 120 h 和 168 h 预报, 滑动训练期和固定训练期超级集合预报效果明显好于日本模式预报和集合平均预报, 并且滑动训练期的超级集合预报效果稍略好于固定训练期预报, 特别是对 8 月后期时段的预报, 但总体看, 两者的预报效果相差不大。24 h 和 72 h 预报中, 日本模式预报效果明显好于各模式的集合平均预报; 但 120 h 预报, 两者预报效果在不同时次各有优劣, 均方根误差曲线交叉进行; 168 h 预报集合平均预报结果已好于日本模式预报。

同样, 由 5 个成员预报结果及其中效果最好的日本预报结果与集合平均、固定训练期和滑动训练期超级集合预报的 850 hPa 温度场的逐日相关系数

可看到(图 4), 其预报结果与均方根误差检验结果基本一致。从图 4a 可知, 日本模式在各时次的相关系数明显好于其他模式预报, 由此选取日本模式的 850 hPa 温度场预报结果与超级集合预报进行对比。由图 4b 可看到, 24, 72, 120 h 和 168 h 预报, 滑动训练期和固定训练期超级集合预报效果明显好于日本模式预报和集合平均预报, 且滑动训练期的超级集合预报效果与固定训练期预报基本一致, 24 h 和 72 h 预报中, 日本模式预报明显好于各模式的集合平均预报; 但对于 120 h 预报, 两者预报效果在不同时次各有优劣; 对于 168 h 预报, 集合平均预报结果已好于日本模式预报。

由此可见, 对于 850 hPa 温度场预报, 滑动训练期和固定训练期超级集合预报结果明显好于参与集合的各模式预报和集合平均预报。在 120 h 预报前, 集合平均预报结果较日本模式预报结果差, 但随着预报时效的延长, 集合平均预报效果优于日本模式预报。

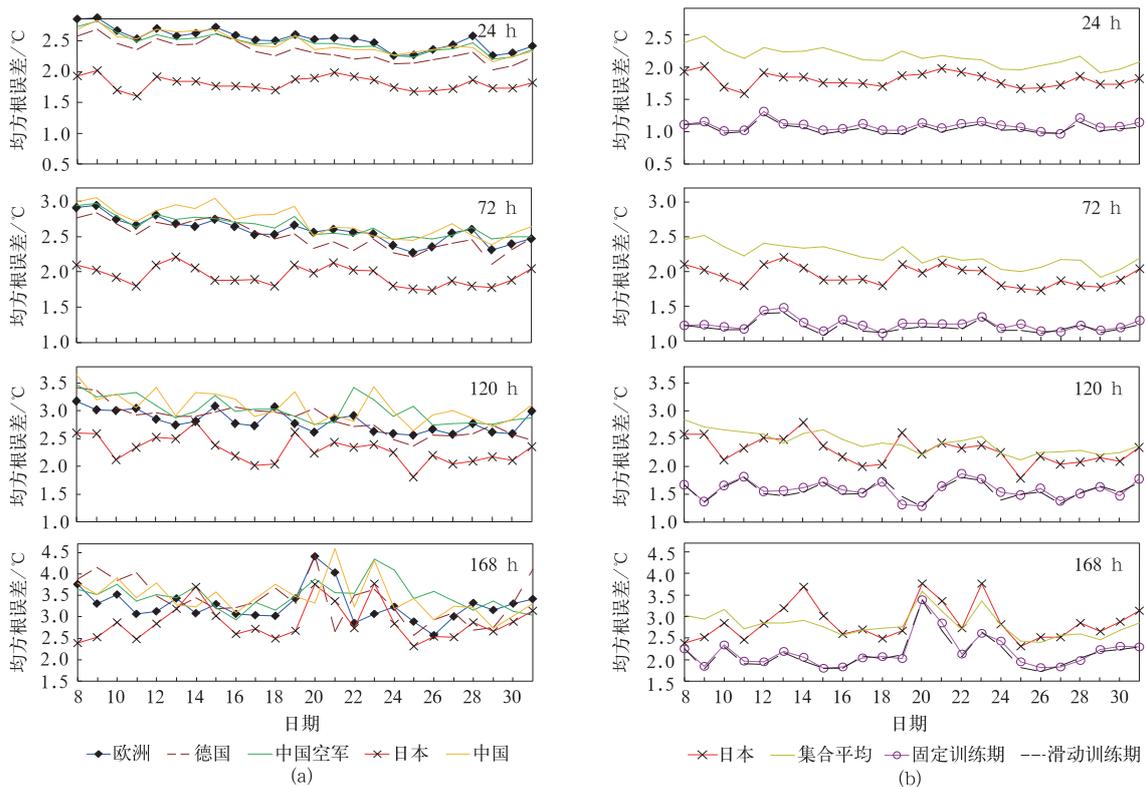


图 3 2010 年 8 月 5 个成员预报结果(a)及日本预报结果与集合平均、固定训练期和滑动训练期超级集合预报(b)的 850 hPa 温度场的逐日均方根误差

Fig. 3 The RMSE of 850 hPa temperature daily forecast about five models(a) and JMA, the multi-model ensemble mean, unchanged superensemble, the changed superensemble(b) in August 2010

### 3.2 固定和滑动集合预报的总体验证

在逐日预报对比检验基础上,为考察超级集合预报在预报期的整体预报效果,将各预报结果在 8 月预报期的平均检验量进行对比分析。图 5 为预报期内 5 个成员预报结果最好者与集合平均、固定训练期和滑动训练期超级集合预报的间隔 24 h 的 7 d 平均均方根误差和平均相关系数。由图 5 可知,8 月预报期 500 hPa 位势高度场预报的平均均方根误差(图 5a),随着预报时次延长,各预报结果的均方根误差均增加,说明预报能力均逐渐减弱;在 120 h 即第 5 天预报前,滑动超级集合预报均方根误差最小,其次是固定超级集合预报,再次是欧洲预报,最后是集合平均预报,即滑动超级集合预报效果最好;对 144 h 和 168 h 预报,滑动超级集合预报还是略好于固定超级集合预报,且好于其他预报结果,但集合平均预报结果要好于欧洲预报,且欧洲预报均方根误差增长幅度较大,说明至第 6 天和第 7 天的预报,即使集合平均预报已优于单个成员预报。500 hPa 位

势高度场预报的相关系数(图 5b),随着预报时次延长,各预报结果的相关系数均减小,即预报结果与客观分析场的相似程度逐渐减弱;对 24 h 和 48 h 预报,集合平均预报的相关系数略高些,其次是固定超级集合预报,再次是滑动超级集合预报,相关系数最小的是欧洲预报,说明第 1 天和第 2 天集合平均预报结果与客观分析场的相似程度略高些;而对于 72 ~144 h 预报,都是固定超级集合预报的相关系数最高,其次是滑动超级集合预报,集合平均预报与欧洲预报的相关系数基本一致;对于 168 h 预报,集合平均预报又略高于超级集合预报,滑动和固定超级集合预报基本一致,欧洲预报略低些。但这 7 d 各预报结果的平均相关系数都只有微小差别,说明整体上各预报结果的相似程度基本一致。由 8 月 850 hPa 温度场预报平均均方根误差可知(图 5c),随着预报时次延长,各预报结果的均方根误差均增大,且超级集合预报结果明显好于其他预报;对于 24 ~168 h 即 7 d 预报中,滑动超级集合预报均方根误差最小,

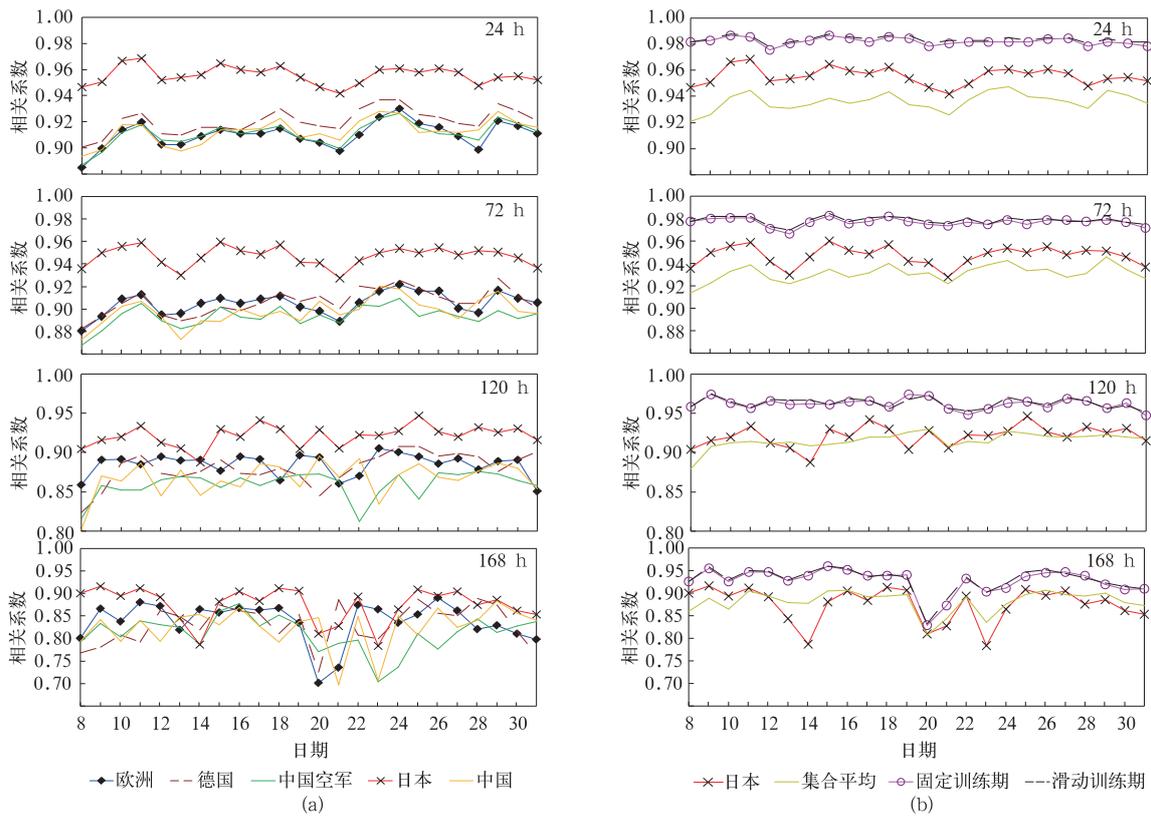


图4 2010年8月5个成员预报结果(a)及日本预报结果与集合平均、固定训练期和滑动训练期超级集合预报(b)的850 hPa温度场的逐日相关系数

Fig. 4 The correlation coefficients of 850 hPa temperature daily forecast about five models(a) and JMA, the multi-model ensemble mean, unchanged superensemble, the changed superensemble(b) in August 2010

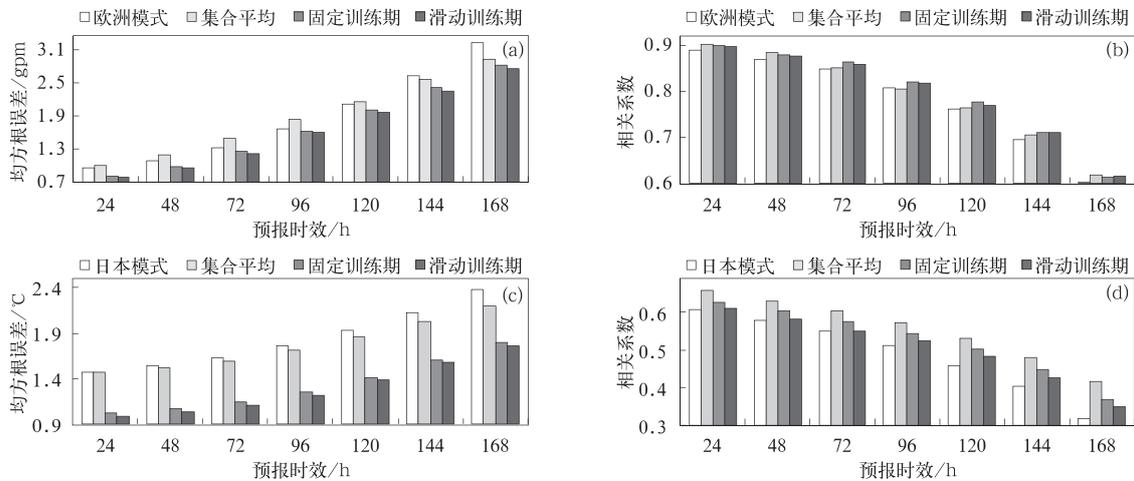


图5 预报期内单一模式与集合平均、固定和滑动训练期超级集合预报的均方根误差和相关系数  
(a)500 hPa 位势高度场平均均方根误差,(b)500 hPa 位势高度场相关系数,  
(c)850 hPa 温度场平均均方根误差,(d)850 hPa 温度场相关系数

Fig. 5 The mean RMSE and correlation coefficients of the best single model, the multi-model ensemble mean, unchanged superensemble, the changed superensemble during the forecasting  
(a)the mean RMSE of 500 hPa geopotential height, (b)correlation coefficients of 500 hPa geopotential height,  
(c)the mean RMSE of 850 hPa temperature, (d)correlation coefficients of 850 hPa temperature

其次是固定超级集合预报,再次是集合平均预报,最后是日本预报,即滑动超级集合预报效果最好,但滑动和固定超级集合预报结果相差不大;在 72 h 前,虽然集合平均预报的均方根误差要小于日本预报,但两者相差不大,且随着预报时效延长,日本模式预报的均方根误差增长幅度加大,即集合平均预报效果在第 3 天后逐渐好于日本模式预报。850 hPa 温度场预报的相关系数(图 5d),对于 24~168 h 预报,集合平均预报的相关系数最大,其次是固定超级集合预报,再次是滑动超级集合预报,最后是日本预报,这说明集合平均预报的 850 hPa 温度场与客观分析场的变化趋势最为相近。

由此可见,对 500 hPa 位势高度场预报,无论从各预报结果均方根误差对比,还是从相关系数看,多模式超级集合预报效果均好于 5 个参与集合的成员预报结果最好者及集合平均预报,即超级集合预报效果最好;且从两检验量可知,滑动超级集合的预报性能略好于固定超级集合预报,而固定超级集合预报的 500 hPa 位势高度场与客观分析场的变化趋势更为相近。对 850 hPa 温度场预报,从均方根误差看,多模式超级集合预报效果明显好于 5 个参与集合的成员预报结果最好者及集合平均预报,但从相关系数看,集合平均预报的 850 hPa 温度场与实际变化趋势最为相近,且固定超级集合也略好于滑动超级集合预报,说明多模式 850 hPa 温度场集合平均预报也有其参考价值。

#### 4 固定和滑动集合预报均方根误差空间分布

由 8 月预报期各预报结果的均方根误差的整体对比分析可知,多模式超级集合无论是对 500 hPa 位势高度场预报,还是对 850 hPa 温度场预报,在各时次均有一定程度提高,特别是对 850 hPa 温度场预报的提高幅度更为明显。为进一步了解各预报结果均方根误差空间分布差异,从而更好地判断各预报结果的误差分布,进而为今后改进模式预报效果提供依据,现对 500 hPa 位势高度场和 850 hPa 温度场的超级集合预报与成员中预报效果最好的模式预报的均方根误差空间分布特征进行对比分析。

由 8 月预报期的整体分析可知,多模式超级集合在各时次预报的 500 hPa 位势高度场和 850 hPa 温度场的均方根误差相比于欧洲模式和日本模式均偏小(图 5a, 5c),而从各预报结果的均方根误差的空间分布可知(图略),各时次的均方根误差分布基本相似。为此,这里只对 24 h 预报结果的均方根误差分布进行对比分析。

图 6 为预报期内滑动超级集合 500 hPa 位势高度场与欧洲模式、850 hPa 温度场与日本模式预报的 24 h 均方根误差空间分布。由图 6 可知,欧洲模式预报的 500 hPa 位势高度场 24 h 均方根误差(图 6a)大值区主要分布在中国青藏高原及以西地区、印度半岛、蒙古和西太平洋地区,其中最大值位于青藏

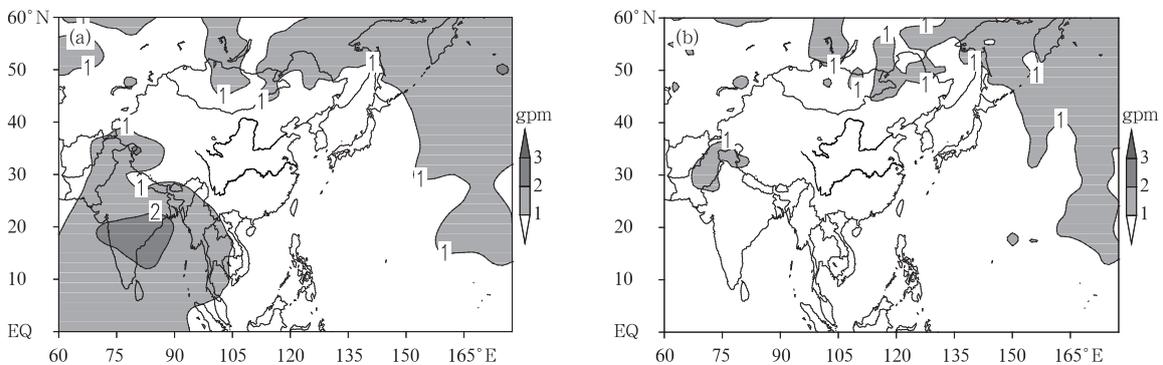
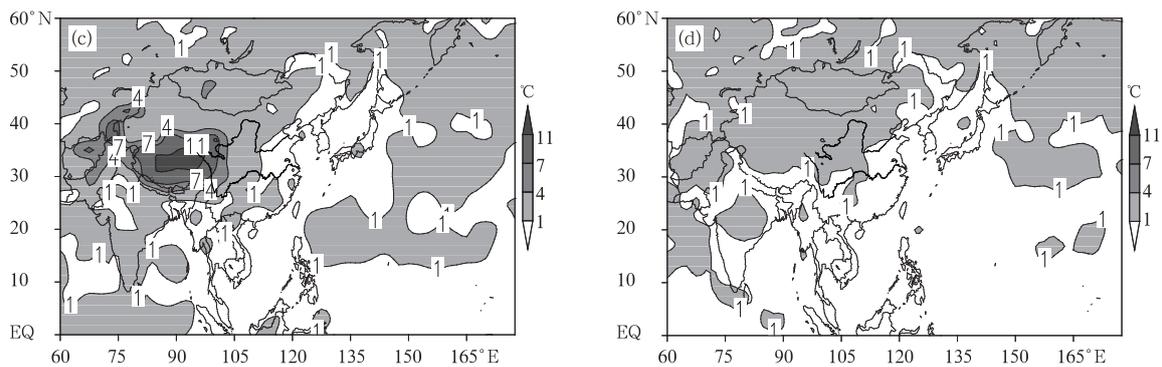


图 6 预报期 500 hPa 位势高度场和 850 hPa 温度场 24 h 预报的均方根误差空间分布

(a)欧洲模式 500 hPa 位势高度场,(b)滑动训练期 500 hPa 位势高度场,

(c)日本模式 850 hPa 温度场,(d)滑动训练期 850 hPa 温度场

Fig. 6 Distribution of RMSE of 24-hour forecast at 500 hPa geopotential height and 850 hPa temperature  
(a)500 hPa geopotential height of ECMWF model, (b)500 hPa geopotential height of the changed superensemble,  
(c)850 hPa temperature of Japan model, (d)850 hPa temperature of the changed superensemble



续图 6

高原的西部。而滑动训练期超级集合预报的 24 h 均方根误差(图 6b)的大值区较前者明显减少,特别是在青藏高原及以西地区、印度半岛及以南的印度洋地区的大值区减弱或消失,并且没有超过 2 gpm 以上的大值中心存在,蒙古地区和东部海上的大值区也减少。日本模式预报的 850 hPa 温度场 24 h 均方根误差(图 6c)数值达 3°C 以上的大值区主要位于青藏高原、蒙古西部至中国新疆、阿富汗一线,其中最大值位于青藏高原,达 9°C。滑动训练期超级集合预报的 24 h 均方根误差(图 6d)较日本模式明显减小,已不存在达 3°C 以上的大值区;达到 1°C 的区域在西太平洋和印度洋地区也明显较前两者减小。

由此可见,多模式超级集合对 500 hPa 位势高度场预报相比于单一模式预报效果的提高主要是在印度半岛、印度洋、青藏高原及以西地区,蒙古及其以北地区也有一定程度的提高,说明超级集合预报对这些地区的预报有一定优势。而多模式超级集合对 850 hPa 温度场预报相比于单一模式预报效果有较大提高的区域主要位于青藏高原、蒙古、中国新疆及其以西地区。

## 5 结论与讨论

本文采用简单集合平均、固定训练期超级集合和滑动训练期超级集合 3 种方法对欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、日本气象厅(JMA)、德国气象局、中国气象局(CMA)以及中国空军气象中心共 5 个决定性模式预报产品的 2010 年 8 月 8—31 日 500 hPa 高度场和 850 hPa 温度场进行 7 d 滚动预报,在对比单一模式预报效果基础上,比较了这 3 种集合方法的预报效果,并对预报结果误差空间分布

进行对比分析,得到如下几点结论:

1) 由 8 月预报期的逐日预报结果对比检验可知,滑动训练期和固定训练期超级集合预报均表现出较好的预报能力,且滑动集合预报对 8 月后期时段预报要略好于固定集合预报,两者预报效果均好于各成员的预报,也好于集合平均预报。但随预报时效延长,集合平均预报的优势提升,第 7 天集合平均的 500 hPa 位势高度场预报可与超级集合预报效果接近,850 hPa 温度场预报可优于日本模式预报。

2) 由 8 月预报期的整体预报结果对比检验可知,无论是 500 hPa 位势高度场预报,还是 850 hPa 温度场预报,多模式超级集合预报结果的均方根误差均最小,且滑动超级集合的预报性能略好于固定超级集合预报。由相关系数可知,500 hPa 位势高度场的各预报结果与客观分析场的相似程度基本一致,而集合平均预报的 850 hPa 温度场与实际变化趋势最为相近,说明简单集合平均预报也有其参考价值。

3) 由预报结果的均方根误差空间分布可知,多模式超级集合预报较单一模式预报效果提高的区域,500 hPa 位势高度场主要位于印度半岛、印度洋、青藏高原及以西地区,而 850 hPa 温度场则主要位于蒙古、青藏高原、中国新疆及其以西地区。

多模式超级集合预报方法根据各集合成员过去的性能表现来分配不同权重系数,从而对其预报进行统计订正,以获得最好的决定性预报。由于权重系数随着空间分布不同,可建立不同预报方程,使预报较好的成员贡献较大,预报较差的成员适当减少其影响,从而使集合预报结果有效降低单一模式系统性预报误差。结果显示,超级集合给出了最好的决定性预报,它比所有的单个模式或模式的集合平

均效果要好。其计算量较小,且可有效提高中短期预报准确率,具有一定的业务应用前景。但如何将其更好地应用于实际保障,进一步提高数值产品的可用性,还需做进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] Lorenz E N. A study of the predictability of 28-variable atmosphere model. *Tellus*, 1965, 17: 321-333.
- [2] Epstein E S. Stochastic dynamic prediction. *Tellus*, 1969, 21: 739-759.
- [3] Leith C E. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. *Mon Wea Rev*, 1974, 102: 409-418.
- [4] Toth Z, Kalney E. Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations. *Bull Amer Meteor Soc*, 1993, 74(12): 2317-2330.
- [5] Toth Z, Kalney E. Ensemble forecasting at NCEP and the breed method. *Mon Wea Rev*, 1997, 125(12): 3297-3319.
- [6] Hamill T M, Snyder M. A comparison of probabilistic forecasts from Bred, singular-vector, and perturbed observation ensembles. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(6): 1835-1851.
- [7] 刘金达. 集合预报开创了业务数值预报的新纪元. *气象*, 2000, 26(6): 21-25.
- [8] Toth Z. Ensemble forecasting in WRF. *Bull Amer Meteor Soc*, 2001, 82(4): 695-697.
- [9] 陈静, 陈德辉, 颜宏. 集合数值预报发展与研究进展. *应用气象学报*, 2002, 13(4): 497-507.
- [10] 李泽椿, 陈德辉. 国家气象中心集合预报数值业务系统的发展及应用. *应用气象学报*, 2002, 13(1): 1-15.
- [11] Krishnamurti T N, Kishtawal C M, LaRow T, et al. Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble. *Science*, 1999, 285: 1548-1550.
- [12] Krishnamurti T N, Kishtawal C M, Zhang Z, et al. Multi-model Superensemble Forecasts for Weather and Seasonal Climate. FSU Report 9928, 1999.
- [13] Evans R E, Walters M K. Calibrated Probabilistic quantitative Precipitation forecasts based on the MRF ensemble. *Wea Forecasting*, 1998, 13: 1132-1147.
- [14] Mylne K R, Clark R T, Evans R E. Quasi-operational Multimodel Multi-analysis Ensembles on Medium range Time scales. AMS 13th Conf on Numerical weather Prediction, Denver, Colorado, 1999: 204-209.
- [15] Ebert E E. Ability of a Poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 2461-2479.
- [16] 周兵, 赵翠光, 赵声蓉. 多模式集合预报技术及其分析与检验. *应用气象学报*, 2006, 17(增刊): 104-109.
- [17] 陈丽娟, 许力, 王永光. 超级集合思想在汛期降水预测集成中的应用. *气象*, 2005, 31(5): 52-54.
- [18] 赵声蓉. 多模式温度集成预报. *应用气象学报*, 2006, 17(1): 52-58.
- [19] 智协飞, 林春泽, 白永清, 等. 北半球中纬度地区地面气温的超级集合预报. *气象科学*, 2009, 29(5): 569-574.
- [20] 陈超辉, 李崇银, 谭言科, 等. 基于交叉验证的多模式超级集合预报方法研究. *气象学报*, 2010, 68(4): 464-476.
- [21] 段明铿, 王盘兴. 一种新的集合预报权重平均方法. *应用气象学报*, 2006, 17(4): 488-493.
- [22] 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. *应用气象学报*, 2009, 20(6): 706-712.
- [23] Krishnamurti T N, Coauthors. Prediction of the diurnal change using a multimodel superensemble. Part I: Precipitation. *Mon Wea Rev*, 2007, 135: 3613-3632.

## Multi-model Super-ensemble Forecasts for the Circulation in August 2010

Dong Haiping Zhang Xiuli Guo Weidong Yan Yan

(Air Force Meteorological Center, Beijing 100843)

### Abstract

Based on 24—168-hour model forecast of ECMWF, JMA, German Bureau of Meteorology, CMA and China Air Force, the multi-model super-ensemble and the multi-model ensemble mean forecasts of 500 hPa geo-potential height and 850 hPa temperature from 8 August to 31 August in 2010 are conducted using fixed training period and running training period. The root mean square error (RMSE) and correlation coefficient are utilized to evaluate forecasts of the super-ensemble, the multi-model ensemble mean, and any one of five models. Meanwhile, the distribution of RMSE about different forecasts is analyzed, respectively. The results show that ECMWF model performs the best in 500 hPa geo-potential height forecast and JMA model performs best in 850 hPa temperature forecast among five models from 24 hours to 168 hours, and the skill of super-ensemble forecast is the best of all. The super-ensemble forecast skill is improved not only in fixed training period but also in running training period, and the super-ensemble result of running training is slightly better than the result of fixed training at the end of the forecast period, and both of them are better than the result of any single model and the simple ensemble mean. But the result of simple ensemble mean has its advantage along with the forecast time. The forecast result of the whole August shows that the value of RMSE in super-ensemble forecast is the least not only in 500 hPa geo-potential height but also in 850 hPa temperature, which is the best of all forecast results, and the result of running training is better than the fixed training. But the value of the correlation coefficient is similar between the forecasts, and the skill of the simple ensemble mean is the highest of all, which means the simple ensemble mean has its advantage. The RMSE distribution of super-ensemble, multi-model ensemble mean, and any single models is quite different over various regions, the skill of super-ensemble is the best of all. The areas of skill improvement by the super-ensemble forecast in 500 hPa geo-potential height are mainly located in Indian Peninsula, Indian Ocean, the Tibet Plateau and its west. The areas of skill improvement by the super-ensemble forecast in 850 hPa temperature are mainly in Mongolia, the Tibet Plateau and Xinjiang of China and its west.

**Key words:** super-ensemble forecast; atmosphere circulation in August 2010; comparison test