

# 欧洲多个耦合气候模式对东亚 冬季气候的预测性能研究<sup>\*1</sup>

张 刚

ZHANG Gang

兰州大学大气科学学院, 兰州, 730000

*College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

2010-08-13 收稿, 2011-05-11 改回.

**Zhang Gang. 2012. Study of East Asian winter climate predictability by using European multi-model ensemble prediction. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(4): 690-703.**

**Abstract** In short-term climate prediction, the multi-model ensemble prediction is widely used as a practical approach. In this paper, the predictability of anomalies for the winter atmospheric circulation and climate in East Asian area ( $0^{\circ} - 60^{\circ}\text{N}$ ,  $70^{\circ} - 140^{\circ}\text{E}$ ) is evaluated by using the 1980 - 2001 hindcast data from the DEMETER multi-model ensemble prediction system. The climate variables used are 500 hPa geopotential height, 850 hPa wind, surface air temperature and precipitation. In this paper, the Ensemble Mean (EM) is used as the primary method to construct the multi-model ensemble prediction. To correct the model predictions, the modes in the prediction space are calibrated by using the Empirical Orthogonal Function. A group of new Synthetic Data Sets are generated and then used as inputs for the Synthetic Ensemble Mean or Synthetic Superensemble (SEM/SSE) method. The results show that, in East Asia, the winter climate anomalies predictability is larger in the tropics than in the middle-high latitudes; besides, the predictability is larger in oceans than in inland areas. Multi-model ensembles, both EM and SEM/SSE, could generally improve the predictability of winter climate anomalies in East Asia, suggesting the multi-model ensembles' advantages against individual models used in the DEMETER project. The two types of method used for multi-model ensemble construction could also influence final prediction results. For geopotential height, wind, and precipitation anomalies, the prediction skill of the SEM/SSE method is better than that of the EM method; while for winter surface air temperature anomaly, the prediction skill of the EM method is better than that of the SEM/SSE method.

**Key words** Short-term climate prediction, Multi-model ensemble, Synthetic data sets, Predictability

**摘 要** 在短期气候预测方法中,多模式集合预测作为一种实用方法得到了广泛的研究。利用 DEMETER 多模式集合预测系统 1980—2001 年的回报试验,研究了欧洲 7 个耦合模式对东亚地区( $0^{\circ}$ — $60^{\circ}\text{N}$ ,  $70^{\circ}$ — $140^{\circ}\text{E}$ )冬季大气环流和气候异常的预测效能。研究的气候要素是冬季 500 hPa 高度场、850 hPa 风场、表面气温场和降水场。集合平均(EM)是最基本的多模式集合构建方法。为了进一步订正模式预测的误差,基于经验正交函数分解进行订正,产生“合成数据集”,并利用该数据集进行合成集合平均或合成超级集合(SEM/SSE)。研究表明,东亚地区冬季气候异常的模式预测效能热带高于中高纬度地区,海洋高于内陆。多模式集合平均和合成集合平均或合成超级集合均从整体上对东亚地区冬季气候异常的预测效能有一定程度的提高,体现了其相对于 7 个单一模式的优势。两类不同的多模式集合方法对预测结果也有一定的影响,其中,合成集合平均或合成超级集合对冬季 500 hPa 高度场、850 hPa 风场和降水场异常的预测效能优于集合平均;但是对于冬季表面气温场异常的预测,集合平均优于合成集合平均或合成超级集合。

\* 资助课题:国家重点基础研究发展计划项目全球变暖背景下东亚能量和水循环及其对我国极端气候的影响(2009CB421406)和国家自然科学基金项目(40875048)及国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906018)。

作者简介:张刚,主要从事气候学研究。E-mail:zhangg06@hotmail.com

**关键词** 短期气候预测, 多模式集合, 合成数据集, 可预测性  
**中图法分类号** P456.7

## 1 引言

中国地处东亚,其大气环流和气候异常主要受季风变化的影响。亚洲地区季风的异常不仅与本地区的降水、旱涝状况密切相关,而且联系着全球环流的异常。中国受东亚季风的影响,气候灾害频发,因此,气候预测,尤其是季节到年际尺度的短期气候预测,是一个重大课题。利用数值模式进行短期气候预测在中外得到广泛的研究(曾庆存等,1990; Stockdale, et al, 1998; Mason, et al, 1999)。但是,由于影响气候的因素比较复杂,使得短期气候预测不可避免地产生误差。预测误差主要可分为资料误差和模式误差,并分别导致初值和模式存在不确定性(任宏利等,2007)。针对这两类不确定性,目前尚未能从理论上估计模式不确定性的概率分布(Palmer, 2001)。因此,多模式集合作为一种实用的方法在近些年得到广泛研究。Krishnamurti等(1999,2000)指出,在季节尺度气候预测中,多模式集合和超级集合方法优于单一模式集合。Peng等(2002)比较了集合平均和基于多元回归的最优集合这两种方法对构建多模式集合预测的影响,指出在历史回报资料不是足够长时,基于复杂统计方法的最优集合其预测结果不一定优于简单的集合平均。为了分析多模式集合是否能比单一模式集合做出更可靠的概率预测,欧洲的 PROVOST (Prediction of Climate Variations on Seasonal to Interannual Timescales)计划和美国的 DSP(Dynamical Seasonal Prediction)计划分别对多模式集合预测进行了试验,证明一般情况下多模式集合预测的概率评分高于单一模式集合(Palmer, et al, 2000)。在 PROVOST 计划成功的基础上,欧盟进一步开展了 DEMETER(Development of a European Multimodel Ensemble System for Seasonal to Interannual Prediction)计划。该计划旨在通过运行7个全球海-气耦合气候模式进行6个月的多模式集合回报试验,深入发展多模式集合预报方法(Palmer, et al, 2004)。

在 DEMETER 计划实施之后,又有很多关于多模式集合预测的研究展开。Hagedorn等(2005)从

若干评价体系验证了在全球尺度上多模式集合的预测效能相对于单一模式集合的优势,并指出这种优势的内在原因是多模式集合方法在一定程度上不仅消除了误差,而且提高了预测的一致性和可靠性。与此同时,如何最大化地利用多模式集合的信息,订正预测的误差也成为研究的焦点。在超级集合的基础上,Yun等(2005)提出了一个通过经验正交函数分解将多模式集合预测结果转化为“合成数据集”的方法,指出该方法优于传统的多模式集合方法。Wang等(2009)分析了 DEMETER 对东亚和西太平洋地区夏季降水异常的预测效能,并基于相似理论提出了一种新的方案对气候异常进行订正。

由于东亚地区的特殊气候条件,DEMETER 多模式集合预测系统能否提高本地区冬季气候异常的可预测性需要进一步研究。本文利用 DEMETER 计划的回报试验资料,结合再分析资料,对 DEMETER 计划中7个单一模式和多模式集合对东亚地区冬季大气环流和气候异常的预测效能分别进行检验;并通过统计方法订正多模式集合预测的误差,进一步改进预测效果。多模式集合预测已成为短期气候预测的方向,但不同地区受到季风系统,陆-海-气相互作用等因素的影响,可预测性差别较大。在多模式集合预测的基础上,本文将分析东亚地区冬季气候异常的可预测性,为利用多模式集合开展东亚地区短期气候预测提供一定的帮助。

## 2 DEMETER 计划和模式预测试验数据介绍

### 2.1 DEMETER 计划简介

DEMETER 多模式集合预测系统(Palmer, et al, 2004)是由以下7个研究机构的全球海-气耦合模式组成的(括号中最后是模式的简称):

- (1) 法国国家气象研究中心(Centre National de Recherche Météorologiques, France;CNRM);
- (2) 欧洲科学计算研究和高级培训中心(European Centre for Research and Advanced Training in Scientific Computation, France;CRFC);
- (3) 意大利国家地球物理与火山科学研究所

(Istituto Nazionale de Geofisica e Vulcanologia, Italy; SCNR);

(4) 德国马普研究所(Max-Planck Institut für Meteorologie, Germany; SMPI);

(5) 法国海洋动力学和气候学实验室(Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie, France; LODY);

(6) 欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; SCWF);

(7) 英国气象局(UK Met Office; UKMO)。

为了检验不同季节对预测结果的影响, DEMETER 回报试验从每年的 2、5、8 和 11 月的 1 日 00 时(世界时)开始, 利用 ERA-40 再分析资料作为初始场, 分别向后积分 6 个月。每个模式分别产生 9 个初始扰动, 对其分别积分得到 9 个集合成员。各模式的回报试验结果统一插值到  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  的网格点上。为了统一比较 7 个模式的预测效能, 本文取其共有的回报时间 1980—2001 年这 22 a 进行研究。王会军等(2008)和王会军(2010)对近几年来有关短期气候预测的若干新成果进行了概述, 包括热带相似思想、年际增量预测方法、统计-动力相结合的预测方法等。关于年际增量的预测思想和方法由范可和王会军等提出、并研制了一系列的基于该思想的夏季降水、冬季气温以及热带气旋活动的预测模型, 这些模型均具有更加优良的预测效果(Fan, 2009a, 2009b; Fan, et al, 2009; 范可等, 2008; 王会军等, 2010)。

本文将研究区域定位为 ( $0^\circ$ — $60^\circ$  N,  $70^\circ$ — $140^\circ$  E)。首先将冬季定义为 12 月和下一年的 1、2 月。每年选取 DEMETER 从 11 月 1 日 00 时开始, 向后积分 2—4 个月的回报结果, 对冬季取平均得到该年度(以 12 月所在的年份记)的冬季气候预测值。

## 2.2 用于检验的再分析资料

为了检验 DEMETER 多模式集合预测的效能, 需要将预测结果与实际资料进行对比分析。对于冬季风场、高度场和表面温度场, 本文采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA-40 再分析资料(Up-pala, et al, 2005)对模式进行检验。对于降水, 本文采用美国气候预测中心(CPC)的降水再分析资料用于模式检验(Xie, et al, 1997)。本文所有再分

析资料的水平分辨率均为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

## 3 主要方法

### 3.1 多模式集合和超级集合方法

在短期气候预测中, 一般用气候要素的距平作为预测对象。对于单一模式集合, 将其 9 个集合成员预测距平的平均值作为单一模式的预测结果。对于多模式集合而言, 最基本的构建方法就是取各单一模式预测距平的平均值作为多模式集合预测得到的距平, 称为集合平均。具体计算公式如下

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F}_i) \quad (1)$$

其中,  $E$  是集合平均得到的预测距平值,  $F_i$  是第  $i$  个模式的预测输出结果,  $\bar{F}_i$  是第  $i$  个模式的模式气候态, 由该模式在回报时段的冬季预测值取平均得到。 $N$  是用于多模式集合的模式个数, 本文  $N=7$ 。

针对某一气候要素在特定区域的预测, 不同的单一模式表现往往差别较大。如果赋给预测效果较好的模式较大的权重, 当权重系数在统计上达到一定的稳定性时, 这样得到的组合结果自然能够提高预测精度。从这个角度出发, 在集合平均的基础上发展起了超级集合方法。表达式如下

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i (F_i - \bar{F}_i) \quad (2)$$

其中,  $S$  是超级集合得到的预测距平值,  $a_i$  是第  $i$  个模式的权重系数, 通过多元回归方法计算得到, 其他变量定义同上。多元回归的  $N$  个自变量分别为  $N$  个模式的预测距平, 因变量则为再分析资料的距平。在运用多元回归方法求各模式的权重系数  $a_i$  时, 涉及训练样本的选择问题。由于本文采用的回报数据长度较短(只有 22 a), 使用交差检验方法进行多元回归分析。对任一年冬季气候距平, 用除去该年的其余 21 a 资料作为多元回归训练样本, 得到的回归系数即为该年超级集合的权重系数。

### 3.2 基于经验正交函数分解的“合成数据集”订正方法

为了进一步改进多模式集合预测, Yun 等(2003, 2005)采用了 SVD 和经验正交函数分解分别对多模式集合预测进行订正。本文采用 Yun 等(2005)提出的基于经验正交函数滤波方法将多模式预测结果转化为“合成数据集”, 然后将该数据集作为输入进行多模式集合或超级集合的研究, 从而可

以对比这类方法相对于原始的集合平均的改进效果。这两种改进方法分别称为合成集合平均和合成超级集合,其具体计算步骤如下:

首先,将实际的再分析资料( $O$ )和多模式预测资料( $F_i$ )分别进行经验正交函数分解。

$$O(x, t) = \sum_{k=1}^K \tilde{O}_k(t) \phi_k(t) \quad (3)$$

$$F_i(x, T) = \sum_{k=1}^K \tilde{F}_{i,k}(T) \varphi_k(t) \quad (4)$$

其中,  $t$  表示训练样本时段,  $T$  表示整个预测时段。 $\phi_k(t)$ 、 $\varphi_k(t)$  分别是实测资料和模式预测结果经验正交函数分解后的第  $k$  个模态;  $\tilde{O}_k(t)$ 、 $\tilde{F}_{i,k}(T)$  分别是对应于第  $k$  个模态的时间系数。 $i$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ ) 为模式的编号。

由于预测场和观测场存在一定的相似性,两者经验正交函数分解所得的模态和其对应的时间系数必然存在一定的关系,利用这样的关系可以对预测结果,尤其是距平模态进行订正。订正的基本思路是将预测结果用实测资料的模态来表示,其时间系数通过多元回归的方法求得。具体计算过程如下:

将实测资料的时间系数写成各预测时间系数的线性组合。

$$\tilde{O}_k(t) = \sum_{k=1}^K \alpha_{i,k} \tilde{F}_{i,k}(t) + \epsilon_{i,k}(t) \quad (5)$$

通过最小化残差  $\epsilon_{i,k}$  可以求出回归系数  $\alpha_{i,k}$ , 这样新的“合成数据集”的时间系数为

$$\tilde{F}_{i,k}^{\text{reg}}(T) = \sum_{k=1}^K \alpha_{i,k} \tilde{F}_{i,k}(T) \quad (6)$$

最后,把上述结果得到时间系数和实测资料经验正交函数分解得到的模态重新组合获得“合成数据集”。

$$F_i^{\text{syn}}(x, T) = \sum_{k=1}^K \tilde{F}_{i,k}^{\text{reg}}(T) \phi_k(t) \quad (7)$$

新的“合成数据集”可以作为各单一模式的集合预测结果进行集合平均或超级平均的研究。该数据集的优点在于经过经验正交函数分解的滤波作用,滤去了对未来气候状态没有影响的时间系数在预测中的作用,并最小化了实测场和预测场之间误差的方差。本文将在上述“合成数据集”基础上进行集合平均或超级集合,并与原始的集合平均或超级集合进行对比分析。

### 3.3 模式预测效能的检验标准

为了检验 DEMETER 计划中 7 个单一模式集合和多模式集合的预测效能,应当确立定量的评价

标准,本文采用距平相关系数( $R_{\text{ACC}}$ )和均方根误差( $E_{\text{RMS}}$ )对预测结果进行评价,具体计算方法如下:均方根误差

$$E_{\text{RMS}}(n) = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (F'(s, n) - O'(s, n))^2} \quad (8)$$

时间距平相关系数

$$R_{\text{ACC}}(s) = \frac{\sum_{n=1}^N F'(s, n) O'(s, n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N F'(s, n) F'(s, n) \sum_{n=1}^N O'(s, n) O'(s, n)}} \quad (9)$$

空间距平相关系数

$$R_{\text{ACC}}(n) = \frac{\sum_{s=1}^S F'(s, n) O'(s, n)}{\sqrt{\sum_{s=1}^S F'(s, n) F'(s, n) \sum_{s=1}^S O'(s, n) O'(s, n)}} \quad (10)$$

式中,  $s$  表示格点的空间位置,  $S$  是总格点数;  $n$  表示年份,  $N$  是资料年份的总数。 $F'(s, n)$  和  $O'(s, n)$  分别是模式预测和实际的距平。

时间距平相关系数评分的主要目的在于检验模式对距平年际变化的预测效能,而空间距平相关系数评分的主要作用在于检验模式对距平场模态的模拟能力。在气候预测中,有可能存在预报结果有较高的空间距平相关系数评分,但是预报量值与实际相差很大的情况。这时需要用均方根误差评分检验模式对距平量值的预测效能。

## 4 DEMETER 多模式集合预测对东亚地区冬季气候异常的预测效能分析

为了全面反映 DEMETER 多模式集合预测系统对东亚地区冬季气候异常的预测结果,选取 500 hPa 高度场、850 hPa 风场、表面气温场和降水场这 4 个要素分别进行可预测性的分析。在计算预测变量的距平时,对于模式预测和实际的再分析资料,采用交差检验方法分别求出其在回报时段的气候平均态,再将各模式预测和再分析资料减去各自的气候平均态即可得到距平值。

### 4.1 冬季 500 hPa 高度场的预测效能

大气环流系统是影响气候预测的大尺度环流背景,因此,对冬季大气环流场异常的预测结果直接关

系到模式的整体预测性能。选用 500 hPa 位势高度场来表征高度场的预测情况。在 7 个单一模式集合的基础上,分别用集合平均和合成集合平均或合成超级集合方法产生多模式集合预测。

首先对研究区域内每个格点求时间距平相关系数,图 1 为时间距平相关系数的分布,其中,距平相关系数超过 0.42 的区域通过了 95% 的显著性水平检验。从图 1 可以看出,各单一模式和多模式集合

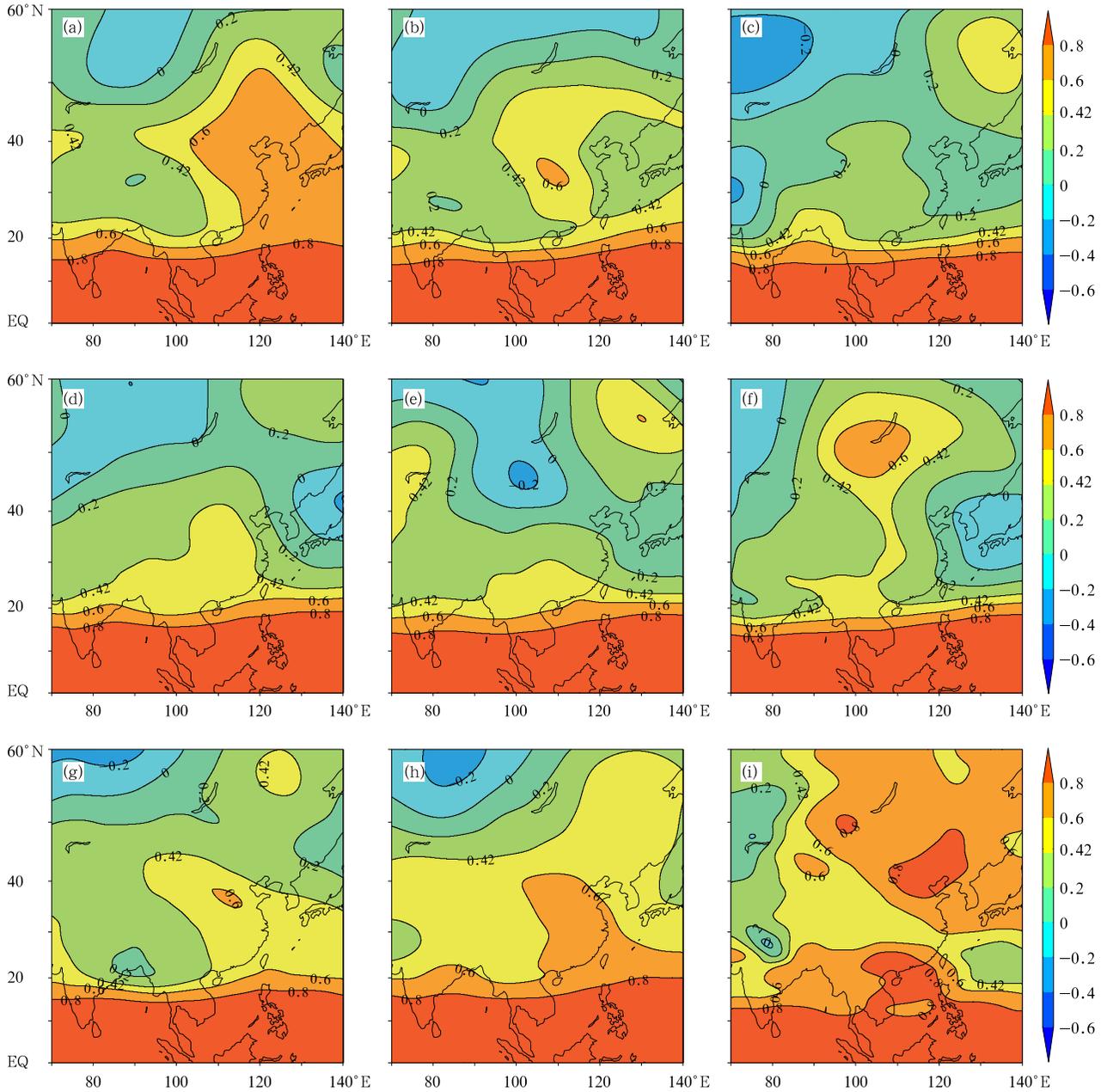


图 1 DEMETER 计划 7 个单一模式,集合平均(EM)和合成超级集合(SSE)的 500 hPa 高度场时间距平相关系数分布 (a. CNRM, b. CRFC, c. SCNR, d. SMPI, e. LODY, f. SCWF, g. UKMO, h. EM, i. SSE)

Fig.1 Temporal Anomaly Correlation Coefficient fields for 500 hPa geopotential height of the seven single model, ensemble mean and synthetic superensemble of the DEMETER project (a. CNRM, b. CRFC, c. SCNR, d. SMPI, e. LODY, f. SCWF, g. UKMO, h. EM, i. SSE)

平均对冬季 500 hPa 高度场距平的预测效能大体呈带状分布,从赤道地区向中高纬度地区递减。各单一模式和多模式集合在 0°—20°N 的热带地区预测效能比较理想,距平相关系数在该地区基本都通过了 95% 的显著性水平检验,7 个单一模式和多模式集合平均、合成超级集合在赤道附近的距平相关系数在 0.8 以上,其空间分布也相近。这些地区由于海-气作用信号比较强,全球海-气耦合模式对这里高度场距平的年际变率有较高的预测效能。从 20°N 向北直到 60°N 的中高纬度地区,各单一模式的预测效能大体上逐渐下降,且距平相关系数的空间分布随模式差异较大。作为 7 个单一模式的集合平均,多模式集合平均在一定程度上提高了 500 hPa 位势高度异常的可预测性。从多模式集合平均结果可以看出,距平相关系数通过 95% 显著性水平检验

的区域相对于单一模式有了明显的扩大,而且,达到 0.6 的区域相对于除 CNRM 外的 6 个模式也有较大的改进。经过多模式集合平均,中国北方的预测结果有了明显的提高,但距平相关系数的负值区仍集中在贝加尔湖以西、巴尔喀什湖以北的内陆地区。由于 7 个单一模式在这个区域的预测效能都比较低,多模式集合平均很难利用现有模式的有用信号来改进这个区域的预测。合成超级集合的距平相关系数通过显著性检验的区域比多模式集合平均的有明显增加,尤其对东亚北部预测能力有所提高。综上所述,从时间距平相关系数来看,多模式集合平均和合成超级集合对东亚地区冬季高度场异常的预测效能优于 7 个单一模式。

进一步分析空间距平相关系数和均方根误差的年际变化(图2、图3)可知,空间距平相关系数和均

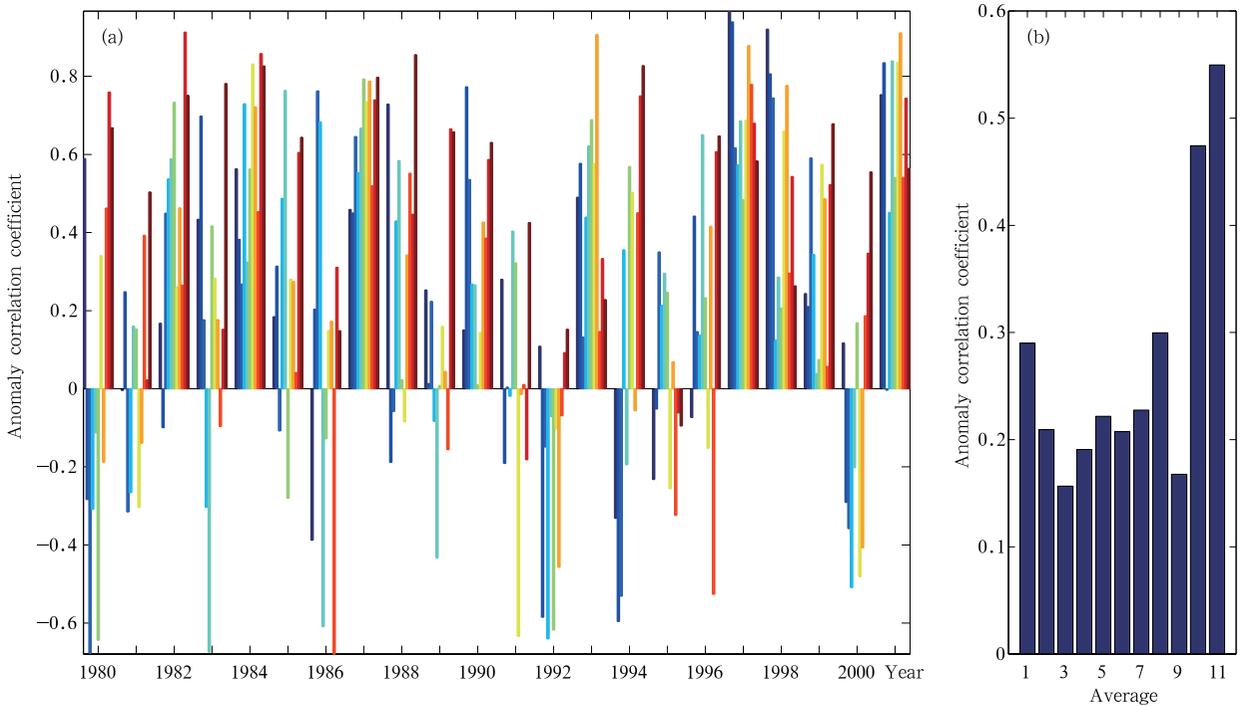


图2 (a)DEMETER 计划 7 个单一模式,集合平均(EM),超级集合(SE),合成集合平均(SEM)和合成超级集合(SSE)的 500 hPa 高度场空间距平相关系数时间序列(从左到右依次为 CNRM、CRFC、SCNR、SMPI、LODY、SCWF、UKMO、EM、SE、SEM、SSE)及(b)距平相关系数的多年平均值(模式顺序同前)

Fig.2 Time series of the spatial anomaly correlation coefficients for the seven single models, ensemble mean, superensemble, synthetic ensemble mean and synthetic superensemble of the DEMETER project. The models (or methods) used is in the sequence the CNRM, CRFC, SCNR, SMPI, LODY, SCWF, UKMO, EM, SE, SEM and SSE. The figure in the right is the average, with the same sequence of models (or methods)

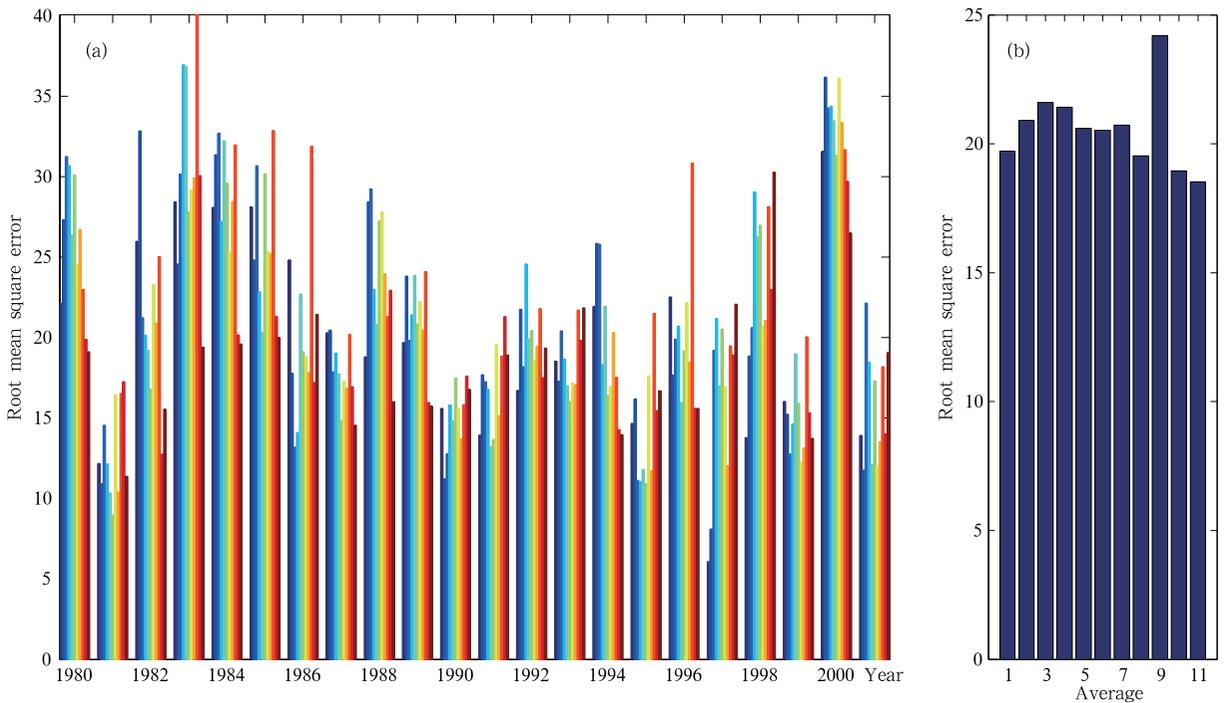


图3 同图2, 但为500 hPa高度场均方根误差

Fig. 3 As in Fig. 2 but for the time series of root mean square error for 500 hPa geopotential height

方根误差在不同年份有很大差异。对比各模式空间距平相关系数和均方根误差的多年平均, 合成超级集合优于合成集合平均和多模式平均, 三者均优于单一模式。上述结果表明在 DEMETER 回报试验中, 合成集合平均/合成超级集合的预测效能高于多模式平均, 且这两种多模式集合方法都优于单一模式集合, 体现了多模式集合在东亚地区冬季高度场异常预测上的优势。而简单的超级集合效果甚至不如很多单一模式, 说明在样本数量有限的情况下, 超级集合并不适用于本研究, 这也从一个侧面说明了“合成数据集”对超级集合的意义。

#### 4.2 冬季 850 hPa 风场的预测效能分析

在分析了冬季高度场之后, 选取冬季对流层低层 850 hPa 的风场进行研究。将分别讨论  $U$  场和  $V$  场异常。图 4 和 5 分别是  $U$  和  $V$  场的时间距平相关系数空间分布, 其中, 相关系数 0.42 以上的区域通过了 95% 的显著性水平检验。各模式对东北信风带处的  $U$  和  $V$  场异常的年际变化有较好的预测能力, 但在  $10^{\circ}\text{N}$  左右各模式均存在一个预测效能低值带, 再向南到赤道地区预测效能又逐渐提高。在中国东部盛行西北风的地区, CNRM 模式对  $U$  场的预测结果较好;  $V$  场的结果比  $U$  场略差, 但在该区域仍优于其他 6 个单一模式。多模式集合结果表明, 集合平均相对于较差的单一模式(如 UKMO)预

测效果有所提高, 但整体上时间距平相关系数评分不如 CNRM, 合成超级集合相对于集合平均而言, 整体上时间距平相关系数评分有所提高, 特别是对  $50^{\circ}\text{--}60^{\circ}\text{N}$  地区的  $U$  场和  $V$  场异常可预测性有了明显的改进。由于这一带是影响东亚冬季天气系统和大气环流异常的上游, 对这里的准确预测有利于改进东亚南部气候异常的预测。但是, 合成超级集合也在一定区域存在缺陷, 例如其在菲律宾以东海洋上对风场的预测能力较集合平均偏低。综上所述, 多模式集合平均对冬季  $U$  和  $V$  场异常预测的时间距平相关系数评分并未达到最优; 合成超级集合相对 7 个单一模式和集合平均有一定程度的改进, 但同样存在区域性的缺陷。

在分析了时间距平相关系数的分布之后, 再进一步来研究多模式集合预测对风场异常模态和量级的预测效能。表 1 给出了各模式以及多模式集合  $U$  和  $V$  场空间距平相关系数及均方根误差的 22 a 平均值。由表 1 的空间距平相关系数比较可知, 对风场异常模态的预测, 合成超级集合优于集合平均, 且都优于 7 个单一模式。然后, 用均方根误差评分来分析各模式预测量级的误差, 结果表明, 集合平均对 850 hPa 风场异常量值的预测能力最好, 而合成集合平均/合成超级集合在这一方面未能体现出相对于单一模式的优势。

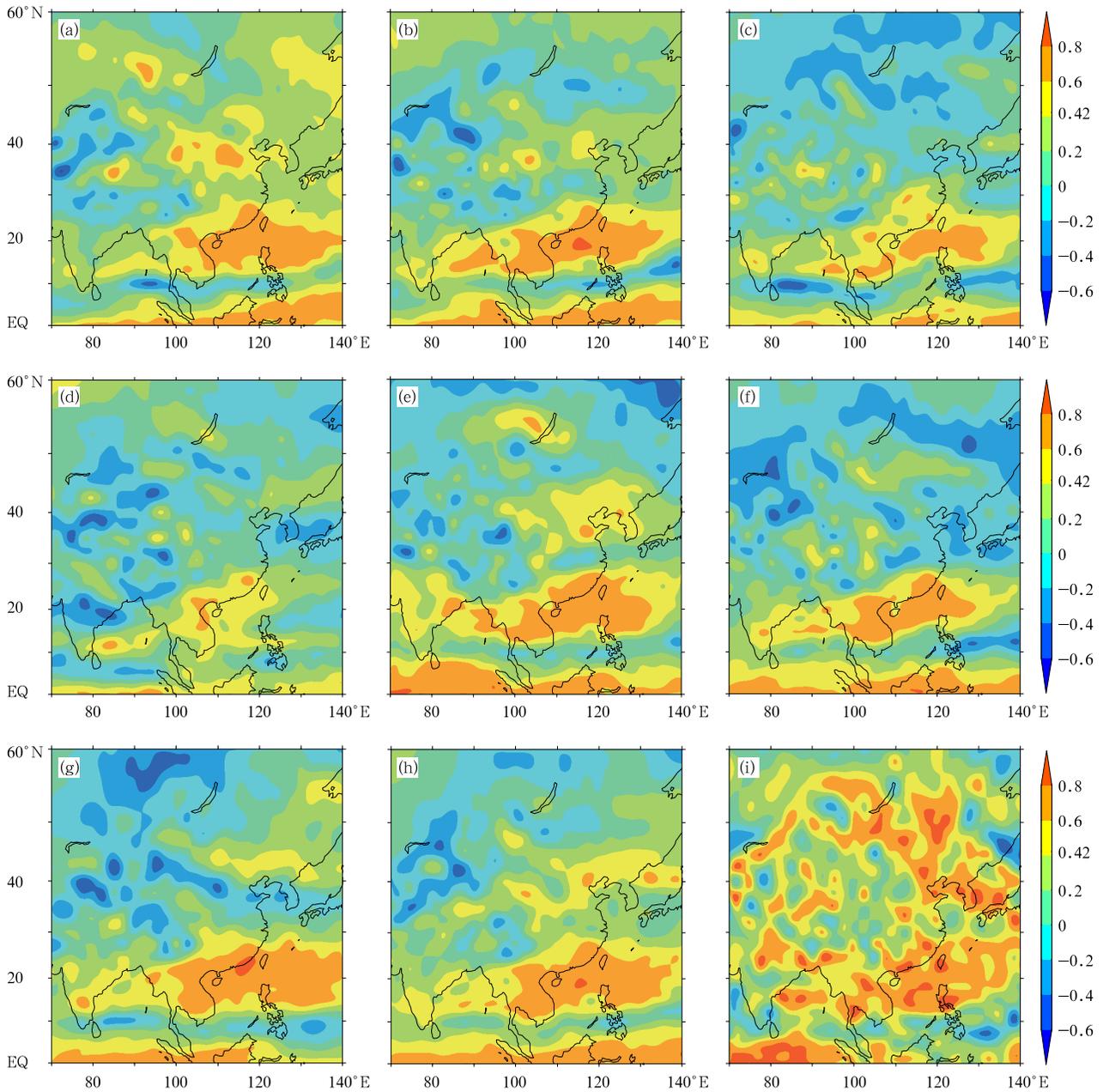


图 4 同图 1, 但为 850 hPa 风场的 U 分量时间距平相关系数

Fig. 4 As in Fig. 1 but for the U component of 850 hPa wind

表 1 冬季 850 hPa 风场空间距平相关系数和均方根误差的多年平均

Table 1 The average of the spatial ACC and RMSE for the winter 850 hPa wind

	CNRM	CRFC	SCNR	SMPI	LODY	SCWF	UKMO	EM	SEM	SSE
U; ACC	0.30	0.31	0.16	0.17	0.30	0.25	0.23	0.33	0.30	<b>0.39</b>
V; ACC	0.23	0.22	0.20	0.11	0.19	0.20	0.20	0.26	0.26	<b>0.39</b>
U; RMSE(m/s)	1.15	1.16	1.12	1.07	0.98	1.01	1.05	<b>0.96</b>	1.06	1.06
V; RMSE(m/s)	0.76	0.76	0.76	0.79	0.74	0.73	0.75	<b>0.71</b>	0.76	0.78

\* 黑体表示最优。

\* Black is the best.

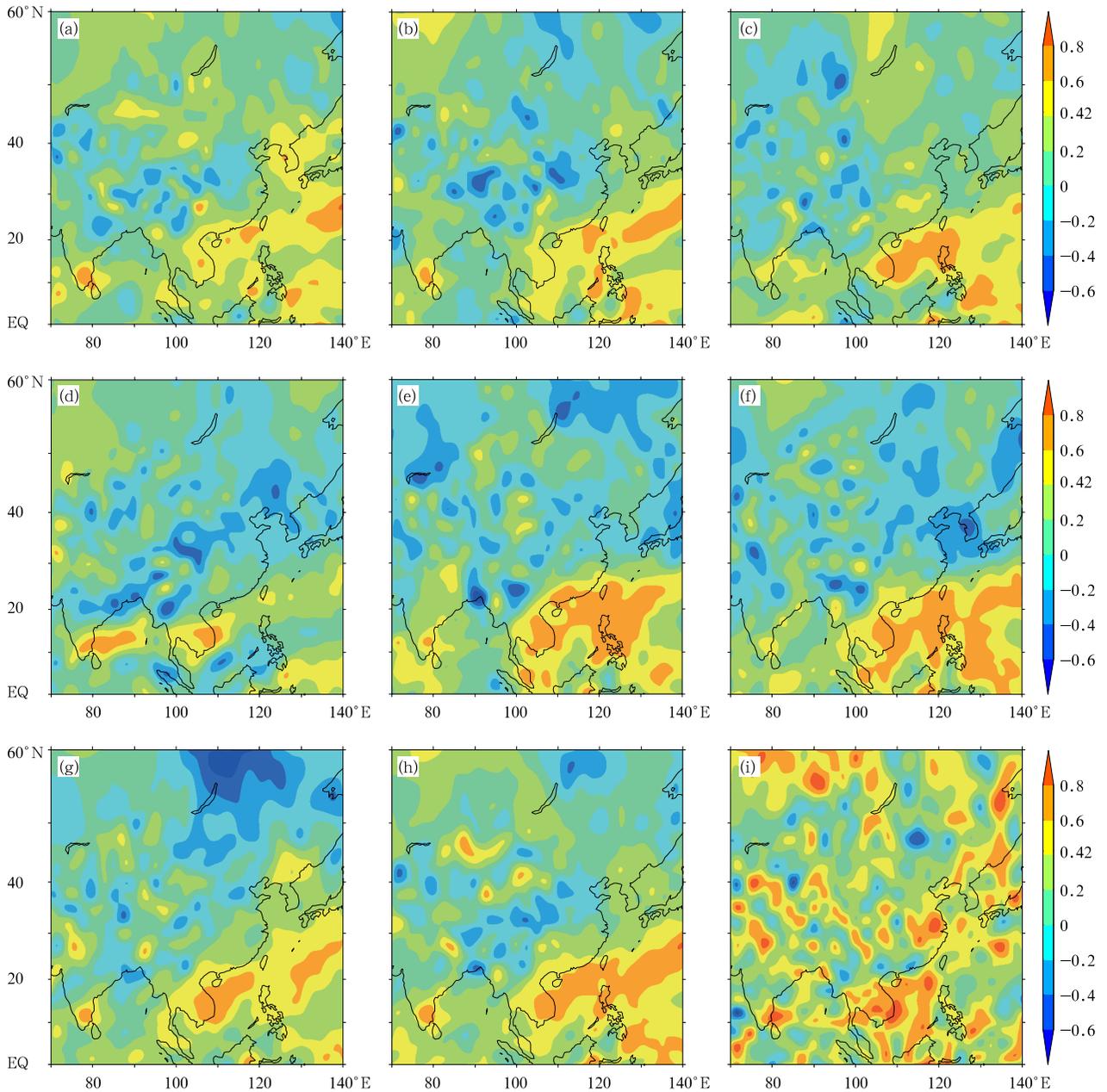


图5 同图1, 但为850 hPa风场的V分量时间距平相关系数

Fig. 5 As in Fig. 1 but for the V component of the 850 hPa wind

综上所述,除了个别模式的时间距平相关系数表现较好外,从整体评分上看多模式集合在东亚冬季风场U和V分量异常的预测中体现出了对单一模式的优势。其中,集合平均主要是改进了预测量值的精度,且在时间距平相关系数和空间距平相关系数评分上都相对单一模式表现出一定的优势。合成超级集合或合成集合平均虽然对预测量值没有明显的改进效果,但是该方法对U和V场的异常模态有非常好的预测效能,较单一模式和集合平均优势

明显,此外合成超级集合对U和V场异常的年际变化也有较好的预测效能,尤其对东亚北部的预测取得了较为满意的结果。

#### 4.3 冬季表面气温场的预测效能分析

冬季气温异常对社会经济和人民生活有着直接的影响,因而对表面气温场的预测是短期气候预测的一个重要方面。受冬季风的影响,东亚地区冬季表面气温也存在较大的年际变率。王会军等(2004)的研究表明,强东亚冬季风年通常对应于北半球高

纬度较强或频繁的冷空气南下,而冷空气势力的相对加强必将进一步导致东亚北部气温的相对降低,并具体表现为表面气温下降。

图 6 对比了冬季表面气温的模式气候平均态和实际气候平均态,可以看出,DEMETER 计划的各个模式对气候平均态有较好的模拟能力。温度从低

纬度向高纬度的带状递减分布以及青藏高原温度低于同纬度地区的特点都得到了很好的呈现。但是,不同模式的结果相对实际值都存在一定的差异,例如,UKMO 模式对青藏高原冷区模拟的范围和强度偏大。SMPI 和 UKMO 模式模拟的 50°—60°N 地区冷区范围和强度也偏大。

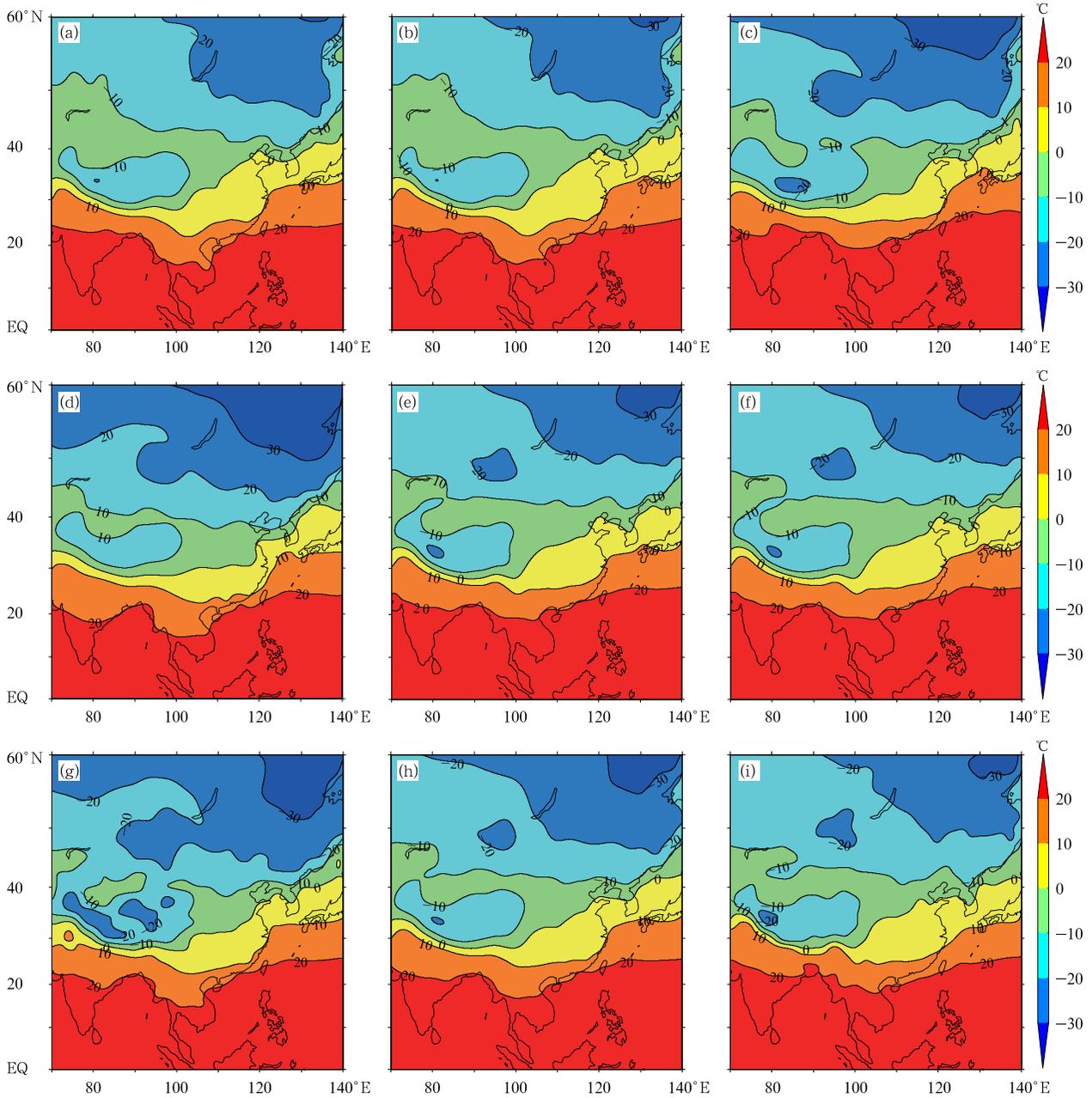


图 6 冬季表面气温场的模式气候平均态和实际气候平均态对比(单位:℃)

(a. CNRM, b. CRFC, c. SCNR, d. SMPI, e. LODY, f. SCWF, g. UKMO, h. EM, i. OBS)

Fig. 6 Comparison between the results of model climatology and observed climatology for the winter surface air temperature (°C)

(a. CNRM, b. CRFC, c. SCNR, d. SMPI, e. LODY, f. SCWF, g. UKMO, h. EM, i. OBS)

图7为冬季表面温度场时间距平相关系数分布,其中,相关系数0.42以上的区域通过了95%的显著性水平检验。7个单一模式中,CNRM和SCNR的预测效能较好,而LODY和UKMO模式则较差。多模式集合平均的结果显示,东亚大陆地区通过95%的显著性水平检验的区域有了明显的增加。相比于CNRM和CRFC模式,集合平均对孟加拉湾及以北地区的预测效能有明显的提高。由于

各单一模式对海洋地区的表面气温异常均有较好的预测效能,因此,集合平均的优势主要体现在大陆上。在集合平均之后,又采用合成超级集合方法,但从时间距平相关系数评分上看,该方法在表面温度场异常的预测中没有优势。相对于集合平均,合成超级集合通过95%显著性检验的区域明显减少。与时间距平相关系数评分较好的单一模式相比,合成超级集合也是相对较差的。同时试验了合成集合

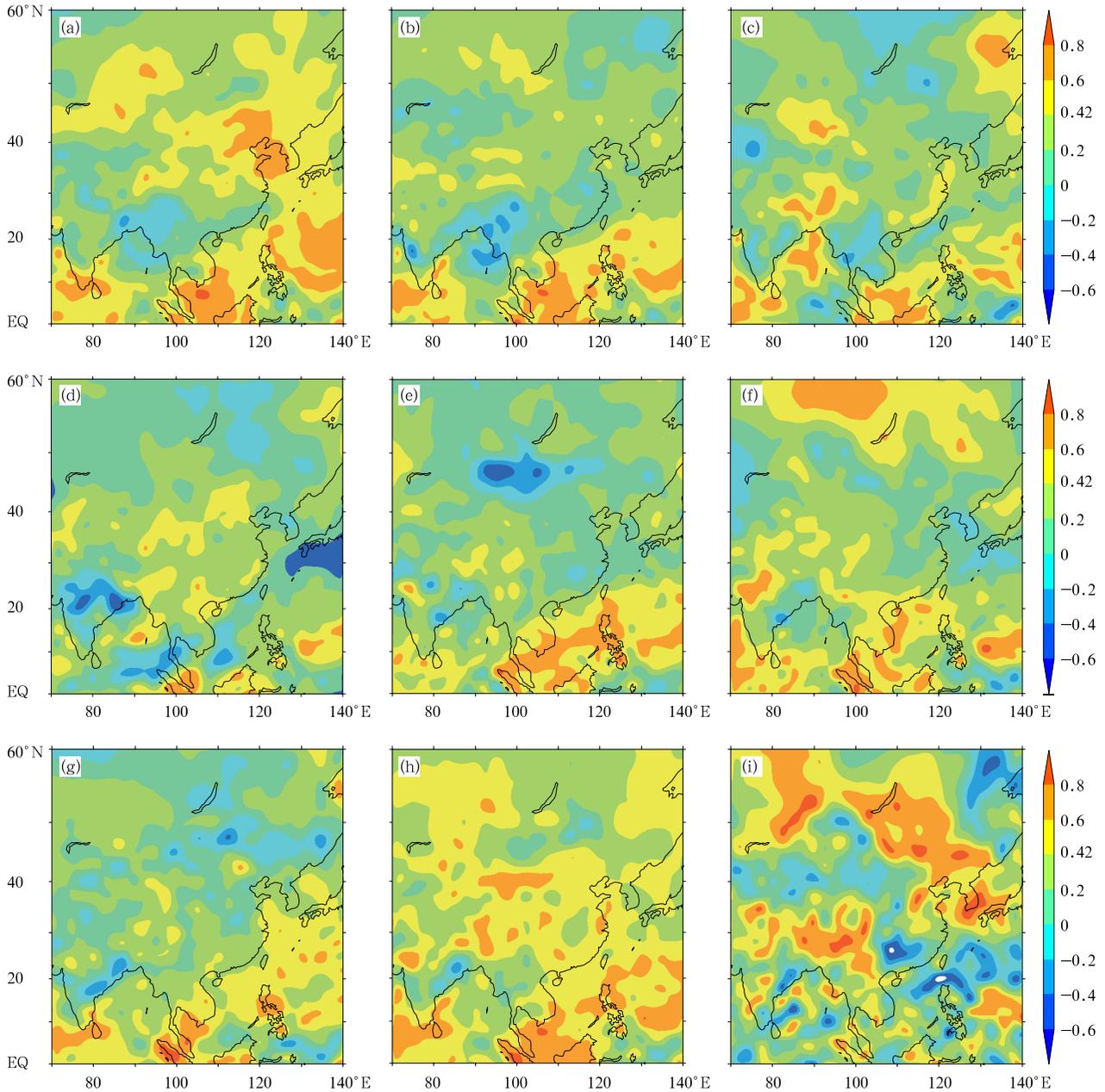


图7 同图1,但为冬季表面气温场时间距平相关系数

Fig. 7 As in Fig. 1 but for the winter surface air temperature

平均的集合方法(图中没有显示),结果与合成超级集合大体相同。通过与再分析资料对比,发现“合成数据集”中各单一模式结果的误差大于相应的实际模式结果,其原因可能是模式的经验正交函数分解模态与实际经验正交函数分解模态存在一定差异,使得经验正交函数分解订正失效。这样造成无论合成集合平均还是合成超级集合都不能很好地订正气温场。因此,从时间距平相关系数评分来看,多模式集合平均相对于单一模式有明显的改进,但是,合成集合平均或合成超级集合的效果不好。

表2给出了空间距平相关系数和均方根误差的22 a平均值。多模式集合平均的空间距平相关系数优于所有单一模式。而合成超级集合的空间距平相

关系数略优于集合平均,合成集合平均较差。均方根误差评分的结果则是集合平均为最优,合成集合平均或合成超级集合均较差。综合来看,受“合成数据集”质量的影响,合成集合平均或合成超级集合的订正效果不佳

综上所述,在冬季表面气温场的预测中,从各个评分角度来看,多模式集合平均均优于7个单一模式,尤其对东亚大陆地区的预测改进明显,体现了多模式集合的优势。与前文的气候要素不同,合成集合平均或合成超级集合方法在东亚冬季表面温度场预测中没有表现出类似的改进作用,其大多数评分结果较集合平均差,与7个单一模式相比也没有明显优势。

表2 冬季表面气温场空间距平相关系数和均方根误差的多年平均

Table 2 The average of the spatial ACC and RMSE for the winter surface air temperature

模式	CNRM	CRFC	SCNR	SMPI	LODY	SCWF	UKMO	EM	SEM	SSE
$R_{ACC}$	0.27	0.23	0.17	0.16	0.16	0.27	0.17	0.33	0.16	<b>0.36</b>
$E_{RMS}(^{\circ}C)$	1.29	1.30	1.39	1.35	1.32	1.24	1.39	<b>1.21</b>	1.45	1.39

\* 黑体表示最优。

\* Black is the best.

#### 4.4 冬季降水场的可预测性分析

最后,分析冬季降水异常的可预测性。在短期气候预测中,目前的气候模式对降水的技巧评分普遍偏低(郎咸梅等,2003),因此,对降水预测的改进尤为重要。通过计算时间距平相关系数,可以发现各单一模式对东亚地区降水的预测效能同样偏低。对于多模式集合,合成集合平均或合成超级集合与集合平均的时间距平相关系数评分大体相当,较单一模式改进效果不明显。

表3给出了冬季降水场的空间距平相关系数和均方根误差。从空间距平相关系数来看,相对于夏

季降水(Wang, et al, 2009),DEMETER计划的各单一模式对冬季降水异常模态的模拟能力较好。总之,对于冬季降水异常的预测,多模式集合的优势主要体现在对异常模态的模拟和异常量值的准确预测上,对降水异常的年际变化改进作用不是很大。两种集合方法集合平均和合成集合平均或合成超级集合相比,在年际变化上二者预测效能大体相当;在异常模态和量级的预测上,合成集合平均的预测效能略优于集合平均。整体而言,多模式集合预测对于东亚地区冬季降水异常的可预测性有一定的提高作用。

表3 冬季降水场空间距平相关系数和均方根误差的多年平均

Table 3 The average of the spatial ACC and RMSE for the winter precipitation

模式	CNRM	CRFC	SCNR	SMPI	LODY	SCWF	UKMO	EM	SEM	SSE
$R_{ACC}$	0.29	0.34	0.31	0.25	0.33	0.31	0.30	0.45	<b>0.48</b>	<b>0.48</b>
$E_{RMS}(mm/d)$	1.17	1.12	1.16	1.24	1.16	1.16	1.29	1.02	<b>1.00</b>	1.12

\* 黑体字为最优。

\* Black is the best.

## 5 总结和讨论

利用DEMETER多模式集合预测系统1980—2001年的回报试验资料,系统研究了多模式对于东

亚地区冬季大气环流和气候异常的预测效能。经过对高度场、风场、表面温度场和降水场的分析,得出以下结论:多模式集合在从整个预测评价体系上优于单一模式集合,其对各气候要素异常的年际变化、

空间模态和异常量值的预测效能有不同程度的提高。集合方法对多模式集合的结果也有重要的影响,具体的集合方法对预测效能的改进仍有待于进一步的研究。在各项评分体系中,可以发现会有某个单一模式预测效能超过集合平均或者合成集合平均或合成超级集合的情形出现,那么这是否意味着可以选择7个单一模式中的一个最优模式来取代多模式集合?事实上,在本文的研究中,这样一个对各气候要素场都能达到最优的单一模式是不存在的。例如,在各要素的时间距平相关系数评分中,可以发现 CNRM 模式的预测结果相对于其他6个单一模式较好,但是 CNRM 模式冬季降水的空间距平相关系数和均方根误差评分在单一模式中仅为中间水平,因而不能称其为最优的单一模式,其预测效能整体上看也不如集合平均和合成集合平均或合成超级集合。其他6个模式也可以得出类似的结论,这从另一个角度说明了多模式集合预测的意义。虽然 DEMETER 计划的7个全球海-气耦合模式在全球尺度上预测效能大体相当,但是这7个单一模式对东亚地区冬季气候异常的整体预测效能还是存在较大的水平差异,例如 CNRM 模式的评分普遍较高,而 UKMO 的各项评分则普遍偏低。因此,发展超级集合方法来调整各个单一模式的权重,成为多模式集合发展的一个重要方向。另外,从单一模式中选取“最优”的组合进行最优子集回归也是多模式集合的一种重要方法。但在现有资料的局限下,该方法的稳定性,以及针对各气候变量的“最优”准则的确立仍有待进一步研究。对于季节-年际尺度的气候预测,由于模式资料的长度有限,同时热带以外地区模式间差异较大,超级集合研究的难点在于从有限的气候预测信息里提取可预测性信号,并减小各类误差等“噪音”的影响。如何利用超级集合来最大程度地利用现有耦合气候模式的效能,在小样本的局限下为气候预测提供相对稳定的统计关系(例如本文中的权重系数),是该方法有待进一步解决的问题。

DEMETER 计划对东亚地区的预测,整体上看对冬季气候异常的预测效能低纬度地区大于高纬度地区,海洋大于陆地。广大中高纬度地区,尤其是内陆地区的冬季气候异常可预测性仍比较低。可预测性的空间分布差异说明全球海-气耦合模式对热带海洋信号和海-气作用有较强的模拟能力。但是随

着纬度升高,大气受海洋信号影响减弱,内部变率增加,使可预测性降低。此外,现有的气候模式对陆-气相互作用的模拟能力相对较弱,这也解释了内陆地区各个模式预测效能普遍较差的原因。因此,进一步改进各单一模式的物理过程,尤其是对陆-气相互作用的细致描述,将是提高中高纬度地区可预测性的根本途径。另外,对模式预测进行统计订正也是提高模式预测效能的重要手段。从本文可以看出,不同的集合方法对预测结果有较大的影响,统计订正方法在存在优势的同时也有其局限性。怎样根据预测要素的不同,合理选择统计订正方法和多模式集合框架,以获得稳定的统计关系,最大程度地利用单一模式的有用信号,也是今后多模式集合预测研究的重点。

**致谢:**感谢欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供 DEMETER 和 ERA-40 数据和技术支持。感谢美国气候预测中心(CPC)提供降水再分析资料,感谢中国科学院大气物理研究所王会军研究员的指导和支持。

## 参考文献

- 范可, 林美静, 高煜中. 2008. 用年际增量方法预测华北汛期降水. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(11): 1452-1459
- 郎咸梅, 王会军, 姜大膀. 2003. 中国冬季气候可预测性的跨季度集合数值预测研究. 科学通报, 48(15): 1700-1704
- 任宏利, 丑纪范. 2007. 数值模式的预报策略和方法研究进展. 地球科学进展, 22(4): 376-385
- 王会军, 姜大膀. 2004. 一个新的东亚冬季风强度指数及其强弱变化之大气环流场差异. 第四纪研究, 24(1): 19-27
- 王会军, 孙建奇, 郎咸梅等. 2008. 几年来我国气候年际变异和短期气候预测研究的一些新成果. 大气科学, 32(4): 806-814
- 王会军. 2010. 东亚区域能量和水分循环对我国极端气候影响研究的一些初步进展. 地球科学进展, 25(6): 563-570
- 王会军, 张颖, 郎咸梅. 2010. 论短期气候预测的对象问题. 气候与环境研究, 15(3): 225-228
- 曾庆存, 袁重光, 王万秋等. 1990. 跨季度气候距平数值预测试验. 大气科学, 14(1): 10-25
- Fan K. 2009a. Predicting winter surface air temperature in North-east China. Atmos Ocean Sci Lett, 2(1): 14-17
- Fan K. 2009b. Seasonal forecast model for the number of tropical cyclones to make landfall in China. Atmos Ocean Sci Lett, 2(5): 251-254
- Fan K, Wang H J. 2009. A new approach to forecasting typhoon frequency over the western North Pacific. Wea Forecasting, 24(4): 974-978, doi: 10.1175/2009WAF2222194.1
- Hagedorn R, Doblas-Reyes F J, Palmer T N. 2005. The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecast-

- ting - I. Basic concept. *Tellus*, 57A(3): 219-233
- Krishnamurti T N, Kishtawal C M, LaRow T E, et al. 1999. Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble. *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 Climate*, 13(23): 4196-4216
- Mason S J, Goddard L, Graham N E, et al. 1999. The IRI seasonal climate prediction system and the 1997/98 El Niño event. *Bull Amer Meteor Soc*, 80(9): 1853-1873
- Palmer T N, Shukla J. 2000. Editorial to DSP/PROVOST special issue. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126: 1989-1990
- Palmer T N. 2001. A nonlinear dynamical perspective on model error: A proposal for non-local stochastic-dynamic parameterization in weather and climate prediction models. *Quart J Roy Meteor Soc*, 127(572): 279-304
- Palmer T N, Alessandri A, Doblas-Reyes F J, Hagedorn R, et al. 2004. Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER). *Bull Amer Meteor Soc*, 85(6): 853-872
- Peng P T, Kumar A, van den Dool H, et al. 2002. An analysis of multimodel ensemble predictions for seasonal climate anomalies. *J Geophys Res*, 107 ( D23 ): 4710, doi: 10. 10129/2002JD002712
- Stockdale T N, Anderson D L T, Alves J O S, et al. 1998. Global seasonal rainfall forecasts using a coupled ocean-atmosphere model. *Nature*, 392(6674): 370-373
- Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 re-analysis. *Quart J Roy Meteor Soc*, 131(612): 2961-3012
- Wang H J, Fan K. 2009. A new scheme for improving the seasonal prediction of summer precipitation anomalies. *Wea Forecasting*, 24(2): 548-554
- Xie P P, Arkin P A. 1997. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull Amer Meteor Soc*, 78 ( 11 ): 2539-2558
- Yun W T, Stefanova L, Krishnamurti T N. 2003. Improvement of the multimodel superensemble technique for seasonal forecasts. *J Climate*, 16(22): 3834-3840
- Yun W T, Stefanova L, Mitra A K, et al. 2005. A multi-model superensemble algorithm for seasonal climate prediction using DEMETER forecasts. *Tellus*, 57A(3): 280-289