

基于交叉验证的多模式超级集合预报方法研究^{* 1}

陈超辉¹ 李崇银^{1,2} 谭言科¹ 王 铁¹

CHEN Chaohui¹ LI Chongyin^{1,2} TAN Yanke¹ WANG Tie¹

1. 解放军理工大学气象学院, 南京, 211101

2. 中国科学院大气物理研究所, LASG, 北京, 100029

1. *Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China*

2. *State Key Laboratory of Numerical Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2008-07-18 收稿, 2008-10-21 改回.

Chen Chaohui, Li Chongyin, Tan Yanke, Wang Tie. 2010. Research of the multi-model super-ensemble prediction based on cross-validation. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(4):464-476

Abstract A multi-model super-ensemble forecasting system with 15 ensemble members generated based on different cumulus parameterization and planetary boundary layer (PBL) schemes by means of changing the AREM, MM5, and WRF three limited-area Mesoscale models' configuration is employed to investigate the potential of multi-model short-range ensemble forecasting in the Huaihe Valley during the rainy season in China. Weighted average by correlation, multivariate linear regression and support vector machines (SVM) for regression are respectively combined with cross-validation in this system in this paper to research the weather elements during the rainy season in July in 2003, which mainly contain the 24-hour accumulated precipitation and streamline field on 700 hPa. The experiment results compared with the traditional ensemble average of the 15 ensemble members and forecast by the T213 model shows that: (1) for the 24-hour accumulated precipitation, the root-means-square error (RMSE) and TS score of the results made by support vector machines for regression is much better than that of the multi-model traditional ensemble average, and also better than that of other two methods; (2) for streamline field on 700 hPa, the first mode and the second mode created by means of vector EOF expanding all the prediction results indicate that the ensemble average decrease mainly the magnitude of wind field and multivariate linear regression and support vector machines for regression can however present a good intensity distribution map of wind vectors with the total effect made by support vector machines for regression being the best among the four means as mentioned above; (3) the results from the multi-model super-ensemble prediction are obviously superior to the simultaneous results created by the T213 model for the wind speed on 700 hPa so that super-ensemble results by SVM can be used for decision-making in advance of the T213 model at least 12 hours in the sight of prediction root-means-square error.

Key words Cross-validation, Super-ensemble prediction, Support vector machines for regression, Vector EOF expansion

摘 要 利用 AREM、MM5 和 WRF 3 个中尺度有限区域模式, 通过选取对短期天气预报影响颇大的积云参数化方案和边界层方案构成 15 个集合预报成员, 以 2003 年 7 月汛期天气为研究对象, 分别采用相关加权、多元线性回归以及支持向量机回归与“交叉验证”相结合的方法, 开展有限区域模式的多模式短期超级集合预报研究。文中主要对上述 3 种方法的 24 h 降水和 700 hPa 流场的超级集合预报结果与多模式集合平均预报结果以及 T213 模式结果进行了对比分析, 结果表明: (1) 对于 24 h 降水, 支持向量机回归方法的超级集合预报得到的均方根误差比多模式集合平均小, 各降水临界值的 TS 异常评分比多模式集合平均高; 并且它也较相关加权法和多元线性回归的超级集合预报效果好。 (2) 对于 700 hPa 流场, 对比分析各预报结果经

* 资助课题: 国家科学自然科学基金 (40575027)。

作者简介: 陈超辉, 主要从事短期集合天气预报研究。E-mail: chenchao2001@163.com

过向量 EOF 分析得到的风场第 1 模态和第 2 模态表明,多模式集合平均主要使风场强度变小,多元线性回归和支持向量机回归的超级集合预报可以较好地刻画风场的强度分布,其中支持向量机回归的超级集合预报对风场强度及其区域分布的预报效果最好。(3)对于 700 hPa 流场,超级集合预报明显优于同期 T213 模式预报,从相同的预报均方根误差意义看,支持向量机回归的超级集合预报至少较 T213 模式预报能提前 12 h。

关键词 交叉验证,超级集合预报,支持向量机回归,向量 EOF 分解

中图法分类号 P456.7

1 引言

自 Epstein(1969)和 Leith(1974)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以来,集合预报经过几十年的重大发展已经成为了数值预报的热点问题,并在许多国家发展起来。它对于延长预报时效,提高预报精度和减少预报不确定性发挥了非常重要的作用。因此,集合预报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”问题的新一代随机动力理论和方法。WMO 也明确把集合预报列为未来数值预报领域的 4 大发展战略之一,全球范围内改进数值预报的主要途径也是集合预报。

截至目前,集合预报理论从最初仅考虑模式初值不确定性发展到同时考虑模式物理过程、动力过程的不确定性,已进一步发展到多模式多分析、多模式多初值的集合预报技术。并且已成功应用于中期数值预报和短期气候预测中,但短期时效的集合预报仍处于发展阶段。短期天气预报中相对重要的对象是降水等强天气过程,已经有一些学者对它的集合预报做了积极的尝试。如 Hamill(1997)和 Du(1997)等采用初值集合方法开展了短期降水集合预报试验。王晨稀等(2003)利用 MM5 模式采用物理集合对梅雨期间 3 次降水进行了集合预报试验。陈静等(2003)也利用 MM5 模式采用物理集合方法进行了华南中尺度暴雨数值预报的集合预报试验。

在上述研究中,降水集合预报以简单平均给出,它能够部分滤去各个集合成员的随机因素,给出比较好的总体效果;也可直接影响预报员做出决策的信心。但从理论或实际应用看,集合平均不能保证其效果在任意时刻比任何集合成员的效果都好,尤其是对于降水等空间不连续要素的预报。越来越多的实例研究证明,集合平均是存在缺陷的,甚至有时会产生误导。例如,集合平均会高估小雨,即降水落区的边界因为平滑而被虚假放大;低估大雨,即对于暴雨等极端天气事件的预报能力也因平滑而降低。这些问题正是目前短期集合预报亟待解决的关键问

题。Krishnamurti 等(1999)基于多元线性回归方法首次提出了超级集合预报的概念,并指出超级集合预报在多季节预报、中期的天气及飓风预报方面胜过所有的预报模式,其预报技巧也高于单独的集合平均预报。最近几年,超级集合预报由于其优越性而得到广泛的应用,Krishnamurti 等(2001)开展了实时多分析-多模式降水超级集合预报,预报技巧高于模式集合平均,Krishnamurti 等(2003)通过一组全球模式进行超级集合预报分别提高了南、北半球 500 hPa 位势高度场距平相关系数的预报能力,Kumar 等(2003)研究了太平洋热带气旋的多模式超级集合预报,Ross 等(2005)开展了通过多模式集合预报减小全球模式数值预报误差的工作,Mutemi 等(2007)开展了非洲各地区的多模式超级集合预报研究,这些工作使短期集合天气预报看到了新的曙光。

基于上述分析,在目前国内中尺度超级集合预报还不多的情况下,我们试图对中尺度超级集合预报作进一步的探索,选用了在短期预报业务及研究中应用相对较多的 AREM、MM5 和 WRF 3 个中尺度数值模式,通过选择不同的积云参数化方案和边界方案产生 15 个集合成员,对 2003 年 7 月的汛期天气建立有限区域多模式超级集合预报。文中除采用传统的多元线性回归制作超级集合预报外,还提出了相关系数加权和支持向量机回归两种新方法制作超级集合预报,并对它们的结果进行对比分析。

在实际工作中,除降水之外,流场的预报对服务保障也同样十分重要,因此,本文的研究又特别分析了风场的情况,即预报对象包括 7 月连续一个月的逐日 24 h 降水和对流层低层 700 hPa 流场。此外,本文研究个例的选取考虑了天气系统演变的时间连续性,以及中国汛期时段集合预报研究的季节代表性,即能够为汛期时段的集合预报提供参考。

2 2003 年 7 月形势、降水情况及资料说明

受西南暖湿气流和冷空气的共同影响,2003 年 6 月下旬至 7 月中旬,淮河流域降雨异常偏多,发生

了自 1954 年以来全流域最大致洪暴雨,最大流量全线超过 1991 年。造成这种降雨的原因是由于 6 月 20 日—7 月 21 日副热带高压脊线稳定维持在 18° — 25°N ,位于江南、华南和西太平洋上空,并且自 5 月中旬以来,亚洲中高纬度多阻塞形势,导致冷空气不断从新疆东部、内蒙古中部和蒙古东部一带交替南下到淮河流域及长江中下游地区。促使冷暖空气稳定交汇于江淮和黄淮地区,导致该地区出现持续时间长、范围广的强降雨。文献(廖捷等,2005;王欢等,2006;姚秀萍等,2007)已详细分析了此次淮河流域汛期异常多雨的各主要天气系统的活动特征及成因,这里不再重复。

本研究中初始资料选用 2003 年 7 月 NCEP 全球 AVN $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的分析场,实况降水采用报文资料,以及后文用于对比的 T213 预报场。

3 试验模式及集成员组成

文中试验模式选用 AREM、MM5(V3.7)和 WRF 3 个有限区域模式。AREM 是由中国科学院大气物理研究所发展的中尺度暴雨数值预报模式,它经过不断的发展,显示出对中国夏季降水较好的预报能力(宇如聪等,2004)。AREM 模式垂直方向取 η 坐标,水平格距 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$,格点数 51×51 ,西边界取为 100°E ,南边界取为 15°N 。整个区域计算范围为 $(20^{\circ}\text{—}40^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{—}125^{\circ}\text{E})$,水平网格采用 E 网格。MM5 模式是美国国家大气研究中心(NCAR)和美国宾州大学(PSU)在 MM4 基础上联合研制并发展起来的中尺度模式,它已在大气科学研究和预报中得到了非常广泛的应用。MM5 模式垂直方向取 σ 坐标,不等距分 20 层,顶层气压取为 100 hPa,水平格距 45 km,格点数 70×70 ,中心点取在 $(27.5^{\circ}\text{N}, 112.5^{\circ}\text{E})$,水平网格采用 B 网格。WRF 模式是由 NCAR、NCEP 等为中心的科研机构联合一些大学开发的,它的研制是为了给理想化的动力学研究、天气预报、空气质量预报以及区域气候模拟提供一个统一的模式框架,属于新一代的先进有限区域模式。WRF 模式垂直方向取地形追随质量坐标,不等距分 20 层,顶层气压取为 100 hPa,水平格距 45 km,格点数 70×70 ,中心点取在 $(27.5^{\circ}\text{N}, 112.5^{\circ}\text{E})$,水平网格采用 C 网格。模式从每日 00 时(UTC)开始积分 48 h。此外,AREM 模式采用静力方案,MM5、WRF 模式采用非静力方案。

在本文所用的模式中,与强天气、强降水密切相

关的积云参数化方案和边界层参数化方案采用不同组合,可构成多模式超级集合预报的 15 个成员(见表 1)。在 AREM 模式中,网格尺度降水过程选择显式云微物理过程(CLD_BIAM)和大尺度饱和凝结过程(CLD_REM0),行星边界层过程主要考虑非局地边界过程(PBL_CCM3)和局地边界层过程(PBL_REM0)。在 MM5 模式中积云参数化方案选择倾向于产生较多对流降水的 Athes-Kuo 方案和可能不太适于强烈对流过程的 Betts-Miller 方案,行星边界层选择适用于高分辨率边界层的 Blackadar PBL 方案和 MRF PBL 方案。在 WRF 模式中,积云参数化方案选用包含深对流过程且取自 MM5 模式的 Kain-Fritsch 方案、与 Grell 相近的多云方案且考虑了对降水切变效应的 Simplified Arakawa-Schubert 方案、以及包含浅对流过程的 Betts-Miller 方案,行星边界层采用 MRF PBL 方案、NCEP Global Forecast System 方案、以及 YSU 方案(MRF PBL 方案的改进形式)。通过这样的组合可以使各线程模拟之间产生较合适的离散度,有利于提高集合预报水平。

表 1 集成员的构成

成员序号	隶属模式	积云参数化方案	边界层参数化方案
1	AREM	CLD_BIAM	PBL_CCM3
2	AREM	CLD_REM0	PBL_CCM3
3	AREM	CLD_REM0	PBL_REM0
4	AREM	CLD_BIAM	PBL_REM0
5	MM5	Athes-Kuo	Blackadar PBL
6	MM5	Betts-Miller	Blackadar PBL
7	MM5	Athes-Kuo	MRF PBL
8	MM5	Betts-Miller	MRF PBL
9	WRF	Kain-Fritsch	MRF PBL
10	WRF	Simplified Arakawa-Schubert	MRF PBL
11	WRF	Betts-Miller	MRF PBL
12	WRF	Kain-Fritsch (new Eta)	NCEP Global Forecast System
13	WRF	Betts-Miller-Janjic	NCEP Global Forecast System
14	WRF	Simplified Arakawa-Schubert	NCEP Global Forecast System
15	WRF	Kain-Fritsch (new Eta)	YSU scheme

4 超级集合的原理与方法

目前气象要素集合预报的确定性预报方式通常采用算术平均,由于其固有的不足,本文引入多元线性回归,相关加权以及支持向量机回归开展多模式超

级集合预报研究,并将它们的结果与集合平均结果进行对比研究。超级集合预报本身是通过将模式以往的预报性能了解进行建模来获得预报时刻物理量的值,故需要立足于一定的样本。文中采用由 AREM、MM5 和 WRF 模式对 2003 年 7 月整月的模拟结果作为样本,对于每一天的预报分别采用算术平均、多元线性回归、相关加权和支撑向量机回归 4 种方法与“交叉验证”相结合的方法开展多模式超级集合预报研究,即对于每一天的预报,用这个月的其他日期数据进行建模,建模成功后用该天的 15 个集合成员结果代入模型,即得到该天的预报。其中计算区域取为 $(20.0^{\circ}-40.0^{\circ}\text{N}, 100.0^{\circ}-125.0^{\circ}\text{E})$,它包含了 2003 年汛期发生降雨过程的所有区域,特别是重点关注的江淮流域;集合成员及实况数据都统一到分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 的网格上,对于计算区域的每一个网格点考虑其空间差异,分别进行建模和计算。选取评估预报效果的标准时,降水采用均方根误差(RMSE)和 TS 格点评分,700 hPa 流场采用经过向量 EOF 分解后的主要空间模态对比分析。

4.1 超级集合预报原理

目前盛行的超级集合预报(图 1)基本都是采用多元线性回归模型开展的,主要思想是把多模式数据集分成训练和预报两个阶段。在训练阶段,对每个格点建立预报值 F 与观测值 O/A 或分析值的多元线性回归模型;即假定观测值 O 的数学期望 $E(O)$ 是 n 个集合预报成员结果 $F_1, F_2, F_3 \cdots F_n$ 的线性函数,即可写成

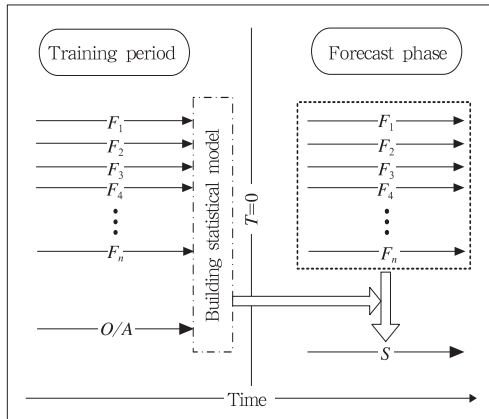


图 1 超级集合预报流程

Fig. 1 The flow chart of super-ensemble forecasts

$$E(O) = a_0 + a_1 F_1 + a_2 F_2 + \cdots + a_n F_n \quad (1)$$

于是多元回归模型记为

$$O = a_0 + a_1 F_1 + a_2 F_2 + \cdots + a_n F_n + \varepsilon$$

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (2)$$

其中 $a_0, a_1, a_2 \cdots a_n$ 为回归系数。

在预报阶段,用训练阶段得到的回归模型计算出超级集合预报值 S 。注意:(1)由于物理过程、地形、以及下垫面边界条件影响不同,故须对每一格点分别建立模型;(2)考虑到超级集合预报模型的稳定性,文中采用了交叉验证技术。

4.2 相关加权法

同前文的超级集合预报原理一样,只是在训练阶段建立模型得到的是相关系数而不是回归系数。即 n 个集合成员得出的结果为 $\{F_i\}$,每个成员的权重为 $\omega_i \geq 0 (i=1, 2 \cdots n)$,则经加权平均法后的结果为

$$O = \sum_{i=1}^n \omega_i F_i \quad (3)$$

其中 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$

用预报结果与观测值的相关系数确定权重的方法就是相关系数加权法。一般地当预报结果与实况值的相关系数是负值时,则采用绝对值。这样,相关系数越大,说明该集合成员的效果越好,相应的权重系数越大。其中当各 ω_i 均相等时,就变为简单的算术平均,即传统的集合平均理论。

4.3 支撑向量机回归法

支撑向量机(SVM)是一种处理非线性分类和回归的有效方法。该方法以统计学习理论为基础,它能够较好地解决小样本、非线性、高维数和局部极小点等实际问题,被认为是目前针对小样本分类、回归等问题的最佳理论。陈永义等(2004)和冯汉中等(2004)详细分析了该方法的特点并在气象分析预测中进行了积极尝试。本文中,其用于超级集合预报的过程简述如下:

(1) 将样本 $\{(x_i, y_i), i=1, 2 \cdots l\}$ 分为用于训练和预报两部分,其中输入值 $x_i (x_i \in R^N)$ 为 N 个集合成员的预报结果;目标值 $y_i (y_i \in R)$ 为对应的观测值或分析值, l 为样本数。

(2) 根据 SVM 回归理论,通过训练样本确定非线性回归预报模型

$$f(x) = \sum_{i=1}^L (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x, x_i) + b \quad (4)$$

$$K(x_i, x) = \exp(-\|x - x_i\|^2 / \sigma^2) \quad (5)$$

其中 $f(x)$ 为通过训练样本构造的预报函数, L 为支

持向量的个数, α_i 、 α_i^* 、 b 为通过训练样本确定的最优超平面的参数。可见, 预报模型只由支持向量完全确定。 $K(x_i, x)$ 是径向基核函数。

(3) 将各成员预报结果代入式(4), 即得到该模型的超级集合预报结果。

5 降水预报试验结果分析

由于数值模式对降水过程的描述与实际降水过程有相当大的差距, 使得降水预报尤其是大雨以上的预报水平较低。集合预报正是针对初值不确定、大气物理过程以及模式自身描述的不完善性而提出的, 它可以通过集合成员的预报结果算术平均过滤掉一些随机不可预报的信息, 其结果通常较单线程

预报准确。尽管如此, 对于降水这种空间不连续量, 集合平均会使降水落区的边界模糊并被虚假扩大, 极端降水事件因平均而漏报。因此开展多模式超级集合预报研究对降水的预报是一个比较有前景的方法。下面主要针对 2003 年 7 月 8—11 日的降雨过程的 24 h 累积降水的集合平均预报结果与相关加权、多元线性回归和支持向量机回归方法得到的多模式超级集合预报结果进行对比分析, 并且采用均方根误差和 TS 评分讨论了这 4 种预报方式对 2003 年 7 月降水的逐日预报效果。

5.1 降水预报个例分析

图2给出的是2003年7月8—11日过程降雨量的实况以及集合平均、相关加权、多元线性回归和

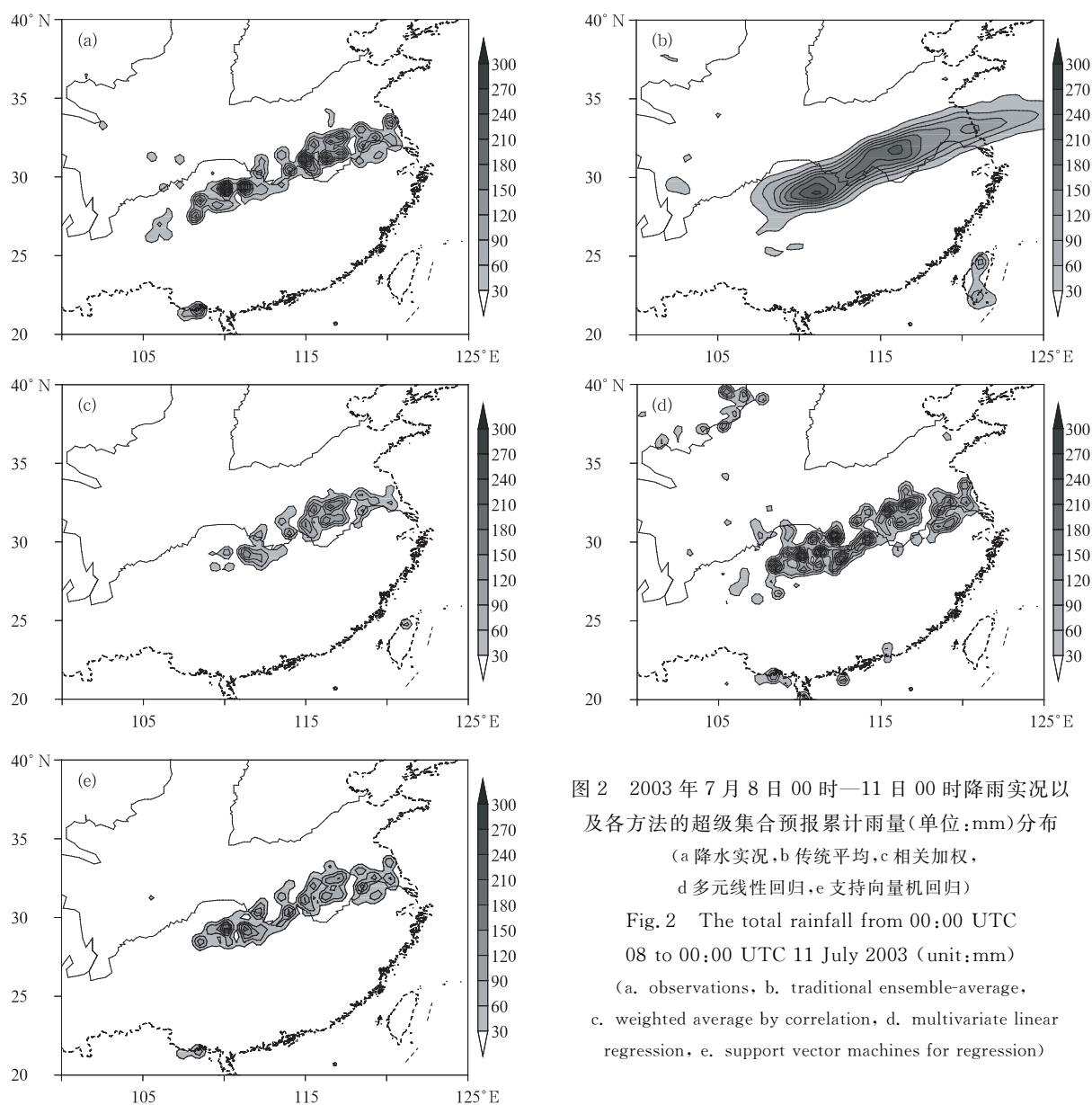


图2 2003年7月8日00时—11日00时降雨实况以及各方法的超级集合预报累计雨量(单位:mm)分布
(a 降水实况, b 传统平均, c 相关加权, d 多元线性回归, e 支持向量机回归)

Fig. 2 The total rainfall from 00:00 UTC 08 to 00:00 UTC 11 July 2003 (unit:mm)
(a. observations, b. traditional ensemble-average, c. weighted average by correlation, d. multivariate linear regression, e. support vector machines for regression)

支持向量机回归超级集合预报的总雨量分布,本次发生在江淮地区的强降水是造成 2003 年淮河流域洪涝灾害的 7 次主要强降水过程之一(图 2a 所示)。在这 3 天中,湖南西北部、湖南北部、湖北东部、安徽和江苏大部分地区连续出现暴雨和大暴雨,局部地区出现特大暴雨。过程总降雨量一般有 50—150 mm,其中江苏中部、安徽大部分地区,湖北东南部,湖南西北部有 200—270 mm,局部地区超过 300 mm,较常年同期偏多 2—4 倍。通过集合平均预报得到的此次降雨过程总降雨量分布(图 2b)可以看出,集合平均预报的结果与实况值相比,雨带的走向基本一致,但强度明显偏小,落区被虚假放大。通过相关加权法超级集合预报得到的总降雨量分布(图 2c)可以看出,相关加权法结果与实况值相比,除雨带的走向与实况相同外,雨带的强度明显偏小,降雨落区也偏小。通过多元线性回归超级集合预报得到的总降雨量分布(图 2d)可以看出,多元线性回归结果的雨带强度分布除湖南和湖北境内的中心强度低于实况值外,其余与实况的分布相近,但宁夏地区的总降雨量较实况偏大。通过支持向量机回归超级集合预报的总降雨量分布(图 2e)可以看出,支持向量机回归结果的雨带除各中心强度略低于实况值外,其余的总雨量分布都较前 3 种方法的结果与实况更接近。通过上面的对比分析,可以定性地认为对降水采用支持向量机回归的超级集合预报效果最好,优于集合平均预报。

5.2 24 h 降水预报均方根误差分析

从 2003 年 7 月研究区域 24 h 累积降水集合平均预报以及相关加权、多元线性回归和支持向量机回归方法超级集合预报结果与实况值的均方根误差演变(图 3)可以看出,在 2003 年 7 月中,采用支持向量机回归方法的超级集合预报结果的均方根误差始终保持最小,并且明显优于多模式集合平均的结果。它也较其他两种方法得到的超级集合预报结果好。此外,对于相关加权法的超级集合预报结果,其均方根误差整月也小于多模式集合平均结果。可见对于降水,采用算术平均的集合预报并不是一种好的预报方式。对于多元线性回归的超级集合预报结果,除 2、3、4、17、20 和 24 日的预报均方根误差小于集合平均预报结果外,其余日期的预报结果均方根误差均大于集合平均结果的均方根误差。即从所有格点的降水预报平均准确程度看,多模式集合平均

较多元线性回归仍然具有一定的优势,但它与支持向量机回归方法的超级集合预报结果相比时,差距较大。综上可得,对于降水,采用支持向量机回归方法的超级集合预报能够较集合平均更有效地给出降水的集合预报结果,并且支持向量机回归方法得到的超级集合预报结果总体效果最好。

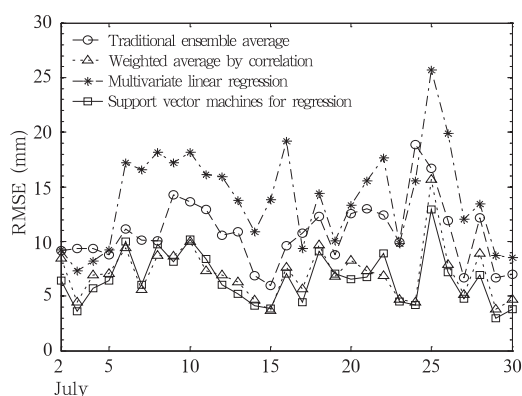


图 3 2003 年 7 月 2 日 00 时—30 日 00 时研究区域各方法对 24 h 降水的预报结果与实况值的均方根误差

Fig. 3 The RMSEs of 24 h accumulative precipitation predicted by ensemble-average, weighted average by correlation, multivariate linear regression and support vector machines for regression, respectively, from 00:00 UTC 2 to 00:00 UTC 30 July 2003

5.3 TS 评分分析

TS 评分能够较好地反映数值模式在某一预报时段内超过物理量的某一临界值的精确程度,它是评估模式模拟异常事件的一个重要量度,通常也被用于降水预报效果的客观定量评价。本文主要是对研究区域的 24 h 累积降水进行 TS 格点评分分析。

图 4 为 2003 年 7 月研究区域 24 h 累积降水通过集合平均预报以及相关加权、多元线性回归以及支持向量机回归方法得到的超级集合预报结果,临界值分别为 10、25、50 和 100 mm 的 TS 评分(单位:%)演变。从图 4a 可以看出:对于临界值为 10 mm 的 24 h 累积降水预报,支持向量机回归方法与多元线性回归方法的超级集合预报结果的 TS 评分在 2003 年 7 月 2—30 日,明显比集合平均和相关加权法预报结果的 TS 评分高,即说明支持向量机回归和多元线性回归方法对超过 10 mm 的降水预报比集合平均和相关法加权法预报精确。从临界值

为 10 mm 的 TS 评分总体效果看,支持向量机回归方法的多模式超级集合预报效果略优于多元线性回归的预报结果,相关加权法的超级集合预报结果与集合平均结果的 TS 评分相比没有明显的优势。从临界值为 25 mm 的 24 h 累积降水量的预报(图 4b)可以看出,支持向量机回归的超级集合预报结果的 TS 评分 2—30 日时段与降水临界值为 10 mm 的情况类似,它明显比集合平均和相关加权法结果的 TS 评分高。多元线性回归结果的 TS 评分除 10 和 24 日低于相关加权法外,其余日期均高于相关加权法结果的 TS 评分;并且所有日期的 TS 评分均高于集合平均结果的 TS 评分。此外,由图可以看出支持向量机回归方法整月的 TS 评分的总体效果与多元线性回归结果的 TS 评分相当。对临界值为 50 mm 的降水量预报(图 4c),支持向量机回归和多元线性

回归方法的超级集合预报结果的 TS 评分仍然明显优于集合平均结果的 TS 评分;相关加权法结果较集合平均结果的 TS 评分上半月略高,下半月偏低。多元线性回归结果的 TS 评分除 7、9 和 10 日低于相关加权法结果的 TS 评分外,其余日期均比相关加权法的高。从整月的总体评分效果看,支持向量机回归结果的 TS 评分与多元线性回归的相当,略优。从图 4d 可以看出:对于临界值为 100 mm 的降水预报,多模式的集合平均结果除 7 月 10 日 TS 评分稍高外,其余日期的临界值为 100 mm 的 TS 评分基本为零。相关加权法的预报结果的 TS 评分分布情况与集合平均结果的类似。支持向量机回归和多元线性回归方法的超级集合预报结果还能基本给出较客观的预报,整月的 TS 评分还较高,且支持向量机回归方法的总体评分结果略优于多元线性回归的结果。

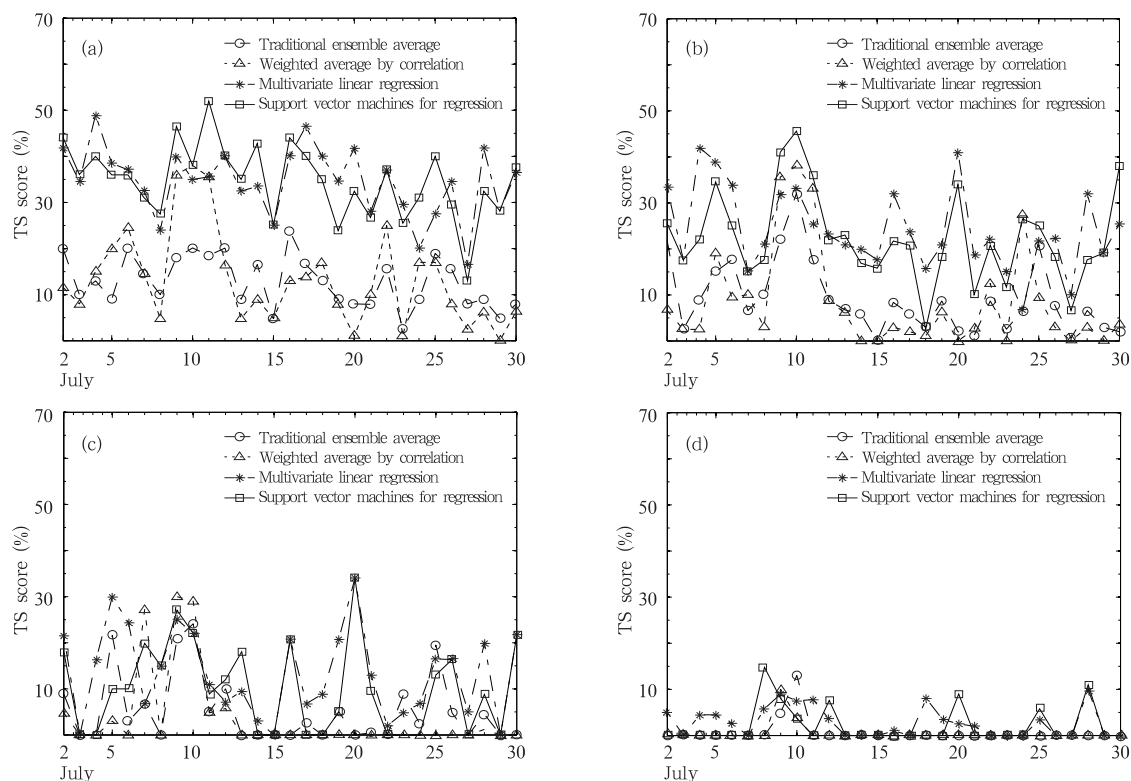


图 4 2003 年 7 月 2—30 日研究区域各方法对 24 h 降水量预报的 TS 评分

(a. 10 mm, b. 25 mm, c. 50 mm, d. 100 mm)

Fig. 4 The TS scores over the research area from 00:00 UTC 02 to 00:00 UTC 30 July 2003 for the different threshold values of

(a) 10 mm, (b) 25 mm, (c) 50 mm and (d) 100 mm, respectively

综合上述,均方根误差是衡量预报场中所有格点预报的平均效果,TS 评分是衡量预报物理量超过某

一临界值的精确程度,从这两个标准的对比分析结果不难发现集合平均并不是降水集合预报确定性预报

最好的方式,超级集合预报的效果不论是从均方根误差或是 TS 评分方面,都可以优于集合平均结果。此外,文中采用的 3 种方法的超级集合预报结果对比分析可得,采用支持向量机回归的超级集合预报效果较好,它整个月的均方根误差明显比集合平均小,各临界值的降水 TS 评分明显比集合平均的高,其预报结论明显优于集合平均。如果采用更多的非平凡样本,支持向量机回归方法的优势会更明显。

6 风场预报试验结果分析

对于风场的分析,本文主要讨论各种方法对水平风场预报结果的空间主要分布模态。水平风场是

一个二维向量,它由纬向风分量和经向风分量组成,所以评价的方法选取向量 EOF 分析(宋正山等, 2001)。向量 EOF 分析可以定量客观地研究环流型态,并且它的主要模态是矢量场,EOF 模态的时间系数包含风场随时间变化的重要信息,对于风场很具有代表性。文中主要针对研究区域的各方法预报结果的 700 hPa 风场展开讨论,计算时风场采用原始数据进行向量 EOF 分解,得到风场的主要空间分布模态和各模态对应的时间系数序列,进行各方法整月风场预报结果评价。

6.1 风场个例分析

由 2003 年 7 月 10 日研究区域实况 700 hPa 流

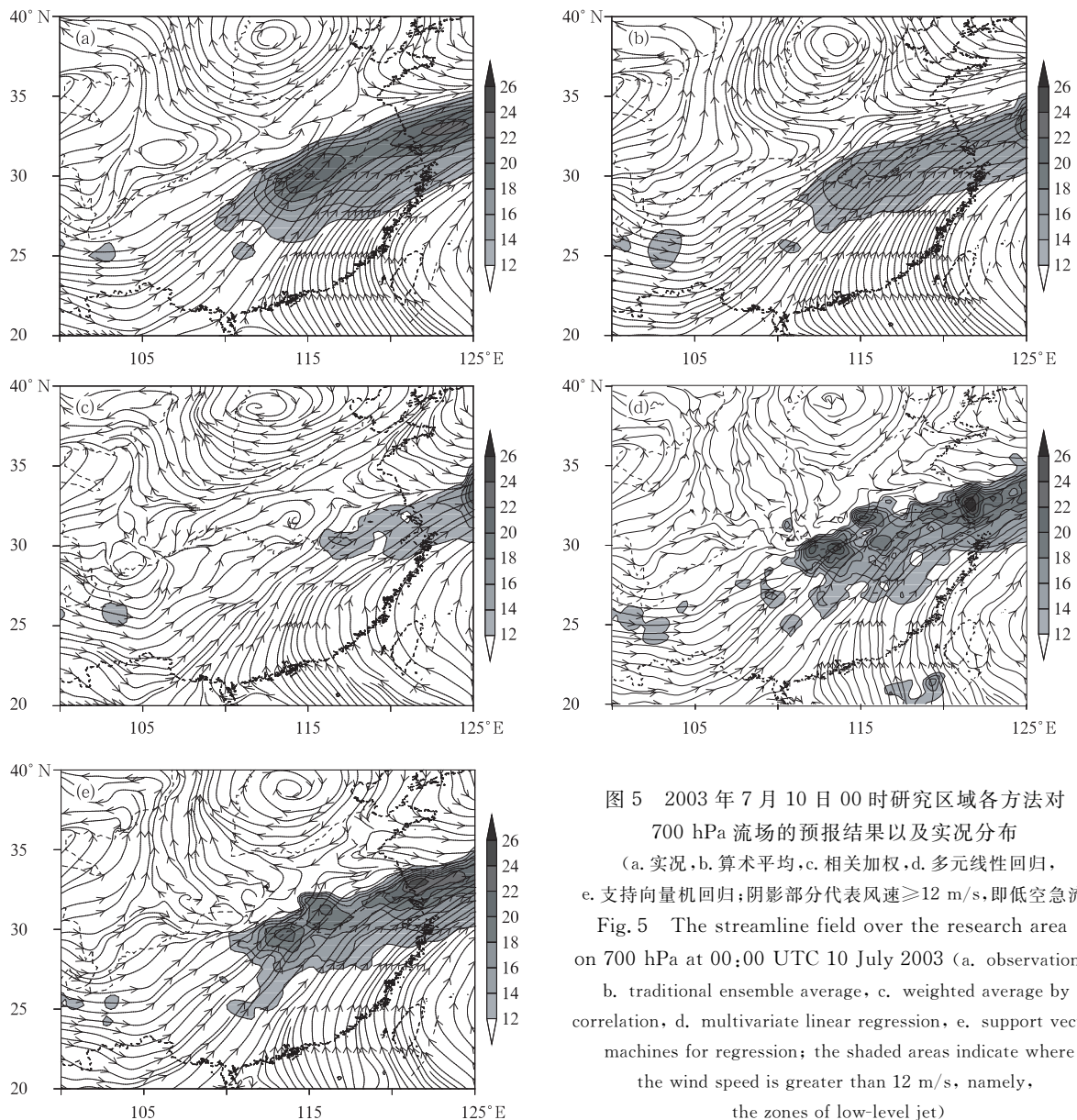


图5 2003 年 7 月 10 日 00 时研究区域各方法对 700 hPa 流场的预报结果以及实况分布

(a. 实况, b. 算术平均, c. 相关加权, d. 多元线性回归, e. 支持向量机回归; 阴影部分代表风速 ≥ 12 m/s, 即低空急流)
Fig. 5 The streamline field over the research area on 700 hPa at 00:00 UTC 10 July 2003 (a. observations, b. traditional ensemble average, c. weighted average by correlation, d. multivariate linear regression, e. support vector machines for regression; the shaded areas indicate where the wind speed is greater than 12 m/s, namely, the zones of low-level jet)

场及低空急流分布与各方法的超级集合预报结果的分布(图5)可以看出,7月10日这天,江淮流域处于西南暖湿气流与蒙古南下的冷空气交汇区域(图5a),并且在华中地区存在一个反气旋性的辐散流,川东地区存在一个“西南涡流”。急流带主要分布在湖北东部、安徽中部、江苏中部。核风速超过20 m/s,中心风速超过26 m/s。正是这样的流场和急流分布型态为此次暴雨提供了必须的热量、动量以及水汽。从研究区域700 hPa流场与低空急流的集合平均预报结果(图5)可以看出,集合平均预报结果与实况相差较大,主要在于川东地区的“西南涡流”产生漏报,并且低空急流带中风速超过20 m/s的急流核也没有预报出来。西南气流强度预报明显偏弱。图5c 700 hPa流场与低空急流通过相关加权法的超级集合预报结果,从图上可以看出,相关加权法超级集合预报结果与实况相差也较大,“西南涡流”漏报,并且低空急流预报结果较差。西南气流强度预报严重偏弱。图5d为研究区域700 hPa流场与低空急流通过多元线性回归的超级集合预报结果,从图上可以看出,多元线性回归的超级集合预报结果与实况相比,华中地区的反气旋流预报较差,“西南涡流”漏报,流场分布型态差异较大,但低空急流的分布和强度预报效果较好。图5e为研究区域700 hPa流场与低空急流通过支持向量机回归的超级集合预报结果,从图上可以看出,支持向量机回归的超级集合预报结果与实况相比,反气旋流和“西南涡流”预报效果较前3种方式好,而且低空急流的分布型态与强度预报也较好。西南气流的强度预报与实况基本一致。总体而言,对于2003年7月10日700 hPa流场和低空急流的预报,支持向量机回归的超级集合预报效果都较其他方法好。

6.2 风场第1模态分析

对2003年7月研究区域700 hPa风场的实况值、集合平均预报值,以及相关加权、多元线性回归和支持向量机回归方法的超级集合预报结果分别进行向量EOF分解。可以得到:实况EOF 1—5各模态所占的方差分别为51.5%、11.1%、7.0%、5.2%、4.2%;集合平均的分别为56.3%、12.3%、7.3%、4.6%、3.2%;相关加权法的分别为35.5%、17.0%、9.6%、5.9%、4.7%;多元线性回归的分别为47.1%、10.5%、7.0%、4.9%、3.9%;支持向量机回归的为51.5%、11.0%、7.3%、4.9%、3.7%。很显然,它们的前两个分量所占方差之和基本都超过

60%。对它们各自特征值误差范围所作显著性检验发现,只有EOF 1和EOF 2两个空间分布模态具有显著比重且通过显著性检验。因此,本文主要分别对EOF 1和EOF 2两个模态进行讨论。

图6给出了2003年7月研究区域700 hPa风场的实况值、集合平均预报值,以及相关加权、多元线性回归和支持向量机回归方法的超级集合预报结果经过向量EOF分解后第1空间模态的水平分布,它主要反应700 hPa水平风场强度变化的空间分布结构。图6a表示的实况700 hPa水平风场强度变化的空间分布特征,可以看出2003年7月实况的强风速区基本以长江为轴线贯穿长江中下游流域,江淮流域风场主要以低空急流模态为主,淮河流域正处于强风区左方的强风速“气旋式”的切变区域,有利于气流垂直上升运动,导致淮河流域持续时间长、强度大、范围广的降水。此外,东海北部靠近中国大陆上空存在一个中心强风速区域。整个风场以西南暖湿气流为主,并且西南风势力较强,占据了整个云贵高原。图6b是风场集合平均预报的第1空间模态,可以发现集合平均的预报结果与实况的主要差别在于,强风速带的分布范围略有偏大,但强度明显变小,强风速中心值比实况低了一个等级。特别是东海上空的中心强风速带强度减弱较大。西南风分布空间形式与实况相似。从这里可以总结出,集合平均与实况的差异主要在于强度明显变低。图6c是相关加权法的风场第1模态,它与实况风场的空间第1模态分布相差较大,主要表现在西南风分布与实况有较大差距,位于江淮流域的风场第一模态明显比实况强度小,范围窄,但在东沙群岛海域强度比实况明显大范围偏强。图6d是风场多元线性回归的超级集合预报结果的第1模态,可以发现多元回归结果主要在云贵高原的分布与实况存在差距。并且风速强度变化分布不如实况的规则。图6e是风场采用支持向量机回归方法的超级集合预报结果的空间第1模态,可以发现支持向量机回归的第1模态的强度和强度变化分布都与实况非常接近,并且明显优于风场采取集合平均预报的第1空间模态的分布。由上面的分析可知,风场方差贡献基本都超过50%的第1模态能够代表各结果的主要特征,并且除相关加权法结果的第1模态与实况存在较大的差距外,其余的方法都能对风场做出较客观的预报,支持向量机回归方法的效果最好,明显比集合平均预报准确。

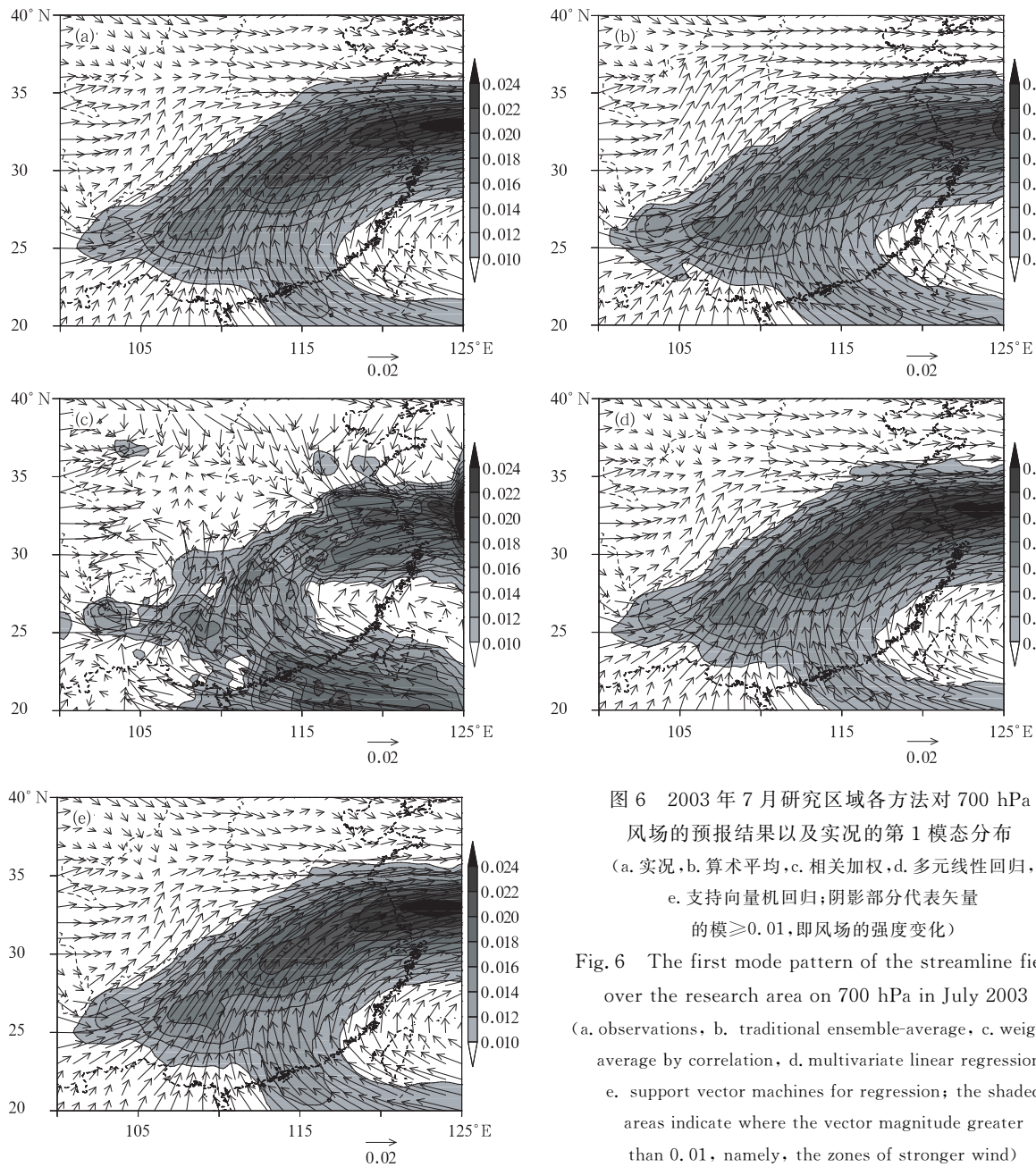


图6 2003年7月研究区域各方法对700 hPa风场的预报结果以及实况的第1模态分布
(a. 实况, b. 算术平均, c. 相关加权, d. 多元线性回归, e. 支持向量机回归; 阴影部分代表矢量的模 ≥ 0.01 , 即风场的强度变化)

Fig. 6 The first mode pattern of the streamline field over the research area on 700 hPa in July 2003
(a. observations, b. traditional ensemble-average, c. weighted average by correlation, d. multivariate linear regression, e. support vector machines for regression; the shaded areas indicate where the vector magnitude greater than 0.01, namely, the zones of stronger wind)

6.3 风场第2模态分析

图7给出了研究区域2003年7月700 hPa风场的实况值、集合平均预报值,以及相关加权、多元线性回归和支持向量机回归方法的超级集合预报结果经过向量EOF分解后第2模态的空间分布。图7a是实况风场的第2模态,强风速区主要分布在陕西的东南部和华南地区,风场主要是东南洋面来的风,并在华东地区呈现一个典型的反气旋(气旋)式的风场结构。整个风场中纬度地区主要以西南向气

流为主,华南地区以东南向气流为主,并且东南向风势力较强,占据了整个云贵高原。图7b是风场集合平均预报结果的第2模态,可以发现集合平均的第2模态与实况相比在陕西境内的强风速带强度减弱,范围变小,而华南地区比实况范围偏大,强度偏小。图7c是相关加权法的风场第2模态,它与实况相比,陕西东南部的风场强度和范围都较弱,华南地区的风场分布比实况强度偏大。图7d是风场采用多元线性回归的超级集合预报结果的第2模态,从

总的风速强度变化分布看,可以发现对应区域,它所预报的强度比实况略小,范围相近。图 7e 是支持向量机回归方法的第 2 模态,可以发现它除在陕西境

内的风场强度比实况较小外,华南地区风场强度和分布范围与实况非常接近,不难看出它也明显优于集合平均的第 2 模态分布。

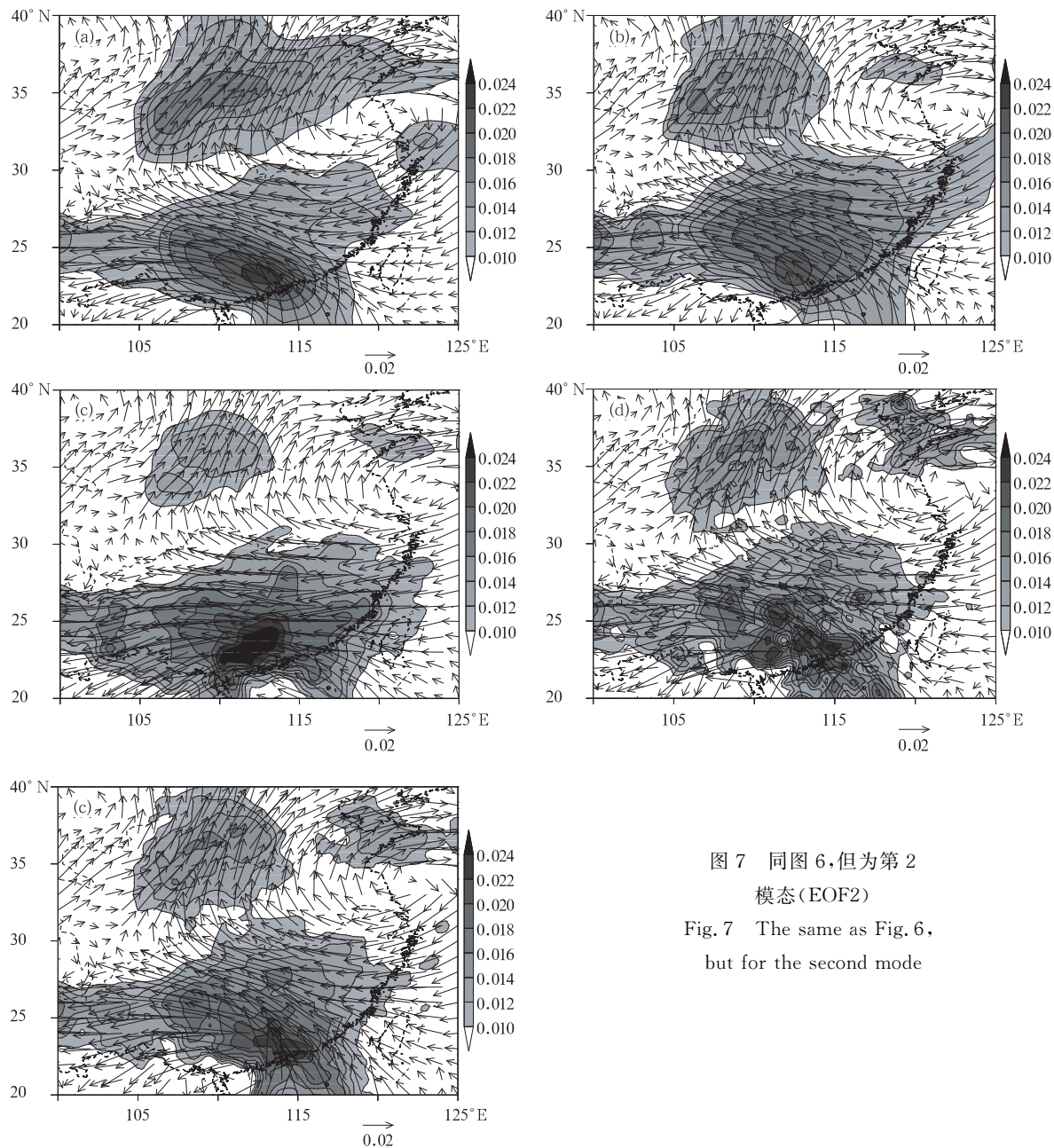


图 7 同图 6, 但为第 2 模态 (EOF2)

Fig. 7 The same as Fig. 6, but for the second mode

此外,通过对 2003 年 7 月研究区域的 700 hPa 风场各预报结果的向量 EOF 分析的第 1 和第 2 模态进行重构,并与实况的重构风场求均方根误差。结果表明,在 7 月 2—30 日中,支持向量机回归方法的超级集合预报结果的均方根误差也始终最小(图略)。

7 超级集合预报与 T213 业务预报比较

为了检验超级集合预报在短期集合预报中的预报技巧,这里给出 2003 年汛期 700 hPa 风速的 24 h 多模式超级集合预报结果与 T213 模式 12、36、60 h 时效的预报结果对实况值的均方根误差演变。

T213 模式起报时间为每日的 12 时,垂直方向有 13 层,由于文中 AREM、MM5、WRF 模式预报截取的分析时刻是每日 00 时,故为便于对比,T213 模式选取预报时效为 12、36、60 h 的预报结果(图 8)。图 8a 为 700 hPa 纬向速度预报技巧对比,图 8b 是 700 hPa 经向速度的对比。从图 8a 可以发现对于 700 hPa 纬向速度,24 h 多元线性回归的超级集合预报技巧比 T213 模式 12 h 的预报水平略高,24 h 支持向量机回归的超级集合预报技巧明显比 T213 模式 12 h 的预报水平高,并且两者也明显优于 T213 模

式 36 和 60 h 的预报。从图 8b 可知,700 hPa 经向速度的 24 h 支持向量机回归的超级集合预报明显比 T213 模式的 12 h 的预报技巧高,也明显优于 T213 模式 36 和 60 h 的预报结果。总的说来,对于三者的有限区域模式的超级集合预报,支持向量机回归的结果最好,多元线性回归的次之。其中,支持向量机回归的超级集合预报对 700 hPa 流场的预报时间较 T213 模式预报至少可以提前 12 h 预报,它显示了超级集合预报在短期天气预报中巨大的应用价值。

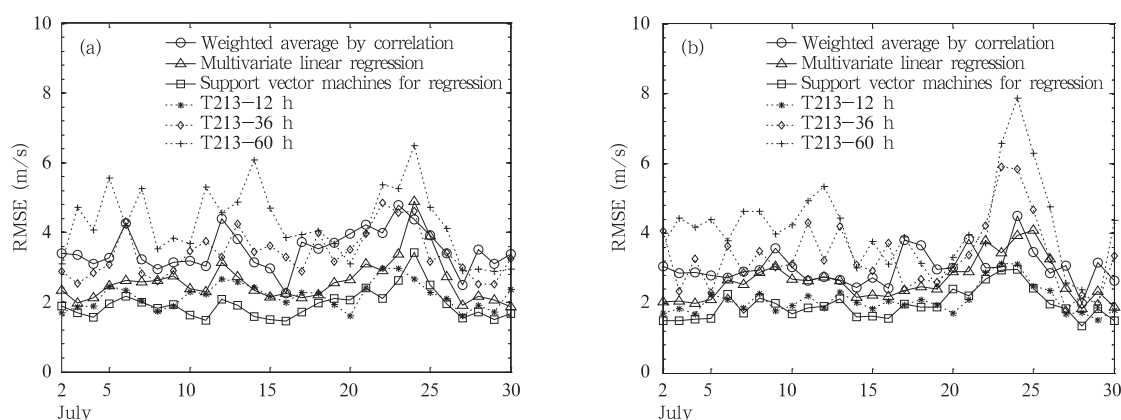


图 8 2003 年 7 月 2—30 日各方法多模式超级集合 24 h 预报与 T213 模式 12、36、60 h 时效的预报对实况值的均方根误差演变
(a. 700 hPa 纬向速度, b. 700 hPa 经向速度; 单位: m/s)

Fig. 8 Temporal changes in the RMSEs against the observations of the super-ensemble results using weighted average by correlation, multivariate linear regression and support vector machines for regression as well as the 12 h, 36 h and 60 h forecasts by the T213 from 00:00 UTC 02 to 00:00 UTC 30 July 2003
(a. latitudinal velocity at 700 hPa, b. longitudinal velocity at 700 hPa; unit: m/s)

8 结 论

本文主要基于 AREM、MM5 和 WRF 三个中尺度模式以 2003 年 7 月汛期降水及 700 hPa 流场为研究对象,分别采用多元线性回归、相关加权以及支持向量机回归方法与“交叉验证”相结合的方式开展多模式超级集合预报研究。通过对 24 h 降水和 700 hPa 流场形势的超级集合预报结果与多模式集合平均预报以及 T213 模式预报的对比分析,得到的主要结论如下:

(1) 对于 24 h 累积降水,从各类预报结果的均方根误差及各临界值 TS 评分的对比分析可知,采用超级集合预报可以比集合平均取得更好的效果;

而采用支持向量机回归的超级集合预报,其降水均方根误差最小、各临界值 TS 评分总体效果最好。因此可以认为,通过超级集合办法可以改善有限区域强降水的预报。

(2) 对于 700 hPa 水平风场,从各类预报结果经过向量 EOF 分析得到的风场第 1 和第 2 模态的对比分析表明,集合平均主要使风场的强度变小,而多元线性回归和支持向量机回归的超级集合预报可以较好地给出风场的强度分布,其中支持向量机回归超级集合预报对风场的强度和区域分布预报效果最好。

(3) 本文的结果说明,不论是降水还是 700 hPa 风场,采用支持向量机回归的多模式超级集合预报

的效果明显优于多模式集合平均预报的效果, 这为短期有限区域集合预报的确定性预报提供了一种新的思路。

(4) 就物理本质上看, 多元线性回归和相关加权法的超级集合预报是对各集合预报成员进行有效的加权而获得; 支持向量机回归超级集合预报是基于对集合预报成员中的关键成员(即支持向量)的加权, 考究的是集合成员群所构造的样本空间与观测值的关系, 一方面其可能更容易描述集合预报成员和观测值之间蕴涵的复杂非线性关系, 另一方面其更能有效利用预报集合中的关键预报提高预报技巧。

(5) 与 Krishnamurti 等(1999)给出的超级集合预报结果相比较, 本文的超级集合预报效果与其相比还不是非常明显, 这可能是该文献中研究的是中长期、季节性气候变化的超级集合预报, 而本文研究的是短期中尺度系统的集合预报, 这两种时间尺度的集合预报在机理上可能还存在某些不同, 其原因的进一步深入研究, 对于提高短期中尺度系统的超级集合预报效果将会十分有利。

参考文献

- 陈静, 薛纪善. 2003. 华南中尺度暴雨数值预报的不确定性与集合预报试验. 气象学报, 61(4): 432-444
- 陈永义, 余小鼎, 高学浩等. 2004. 处理非线性分类和回归问题的一种新方法(I)—支持向量机方法简介. 应用气象学报, 15(3): 345-354
- 冯汉中, 陈永义. 2004. 处理非线性分类和回归问题的一种新方法(II)—支持向量机方法在天气预报中的应用. 应用气象学报, 15(3): 355-565
- 廖捷, 谈哲敏. 2005. 一次梅雨锋特大暴雨过程的数值模拟研究: 不同尺度天气系统的影响作用. 气象学报, 63(5): 771-789
- 宋正山, 杨辉. 2001. 夏季东亚季风区 500 hPa 月环流异常及其与我国降水关系的向量 EOF 分析. 大气科学, 25(3): 401-410
- 王晨稀, 端义宏. 2003. 短期集合预报技术在梅雨降水预报中的试验研究. 应用气象学报, 14(1): 69-77
- 王欢, 倪允琪. 2006. 2003 年淮河汛期一次中尺度强暴雨过程的诊断分析和数值模拟研究. 气象学报, 64(6): 734-742
- 姚秀萍, 吴国雄等. 2007. 热带对流层上空东风带扰动影响西太平洋副热带高压的个例分析. 气象学报, 65(2): 198-207
- 宇如聪, 徐幼平. 2004. AREM 及其对 2003 年汛期降水的模拟. 气象学报, 62(6): 715-724
- Du J, Mullen S L, Sanders F. 1997. Short-range ensemble forecasting of quantitative precipitation. Mon Wea Rev, 125: 2427-2459
- Epstein E S. 1969. Stochastic dynamic prediction. Tellus, 21(6): 739-759
- Hamill T M, Colucci S J. 1997. Verification of eta-RSM short-range ensemble forecasts. Mon Wea Rev, 125: 1312-1327
- Krishnamurti T N, Krishtawal C M, LaRow T E, et al. 1999. Improved weather and seasonal climate forecasts from multi-model super-ensemble. Science, 285: 1548-1550
- Krishnamurti T N, Rajendran K, et al. 2003. Improved skill for the anomaly correlation of geopotential heights at 500 hPa. Mon Wea Rev, 131: 1082-1102
- Krishnamurti T N, Surendran S, et al. 2001. Real-time multianalysis-multimodel superensemble forecasts of precipitation using TRMM and SSM/I products. Mon Wea Rev, 129: 2861-2883
- Kumar T S V V, Krishnamurti T N. 2003. Multimodel super-ensemble forecasting of tropical cyclones in the Pacific. Mon Wea Rev, 131: 574-583
- Lorenz E N. 1965. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. Tellus, 17(3): 321-333
- Mutemi J N, et al. 2007. Multi-model based super-ensemble forecasts for short and medium range NWP over various regions of Africa. Meteor Atmos Phys, 95: 87-113
- Ross R S, Krishnamurti T N. 2005. Reduction of forecast error for global numerical weather prediction by the Florida State University (FSU) super-ensemble. Meteor Atmos Phys, 88: 215-235
- Leith C E. 1974. Theoretical skill monte carlo forecasts. Mon Wea Rev, 102: 409-418