

纪永明,陈静,矫梅燕,等. 基于多中心 TIGGE 资料的区域 GRAPES 集合预报初步试验[J]. 气象,2011,37(4):392-402.

基于多中心 TIGGE 资料的区域 GRAPES 集合预报初步试验^{*1}

纪永明¹ 陈 静² 矫梅燕³ 陈朝平⁴

1 中国气象科学研究院,北京 100081

2 国家气象中心,北京 100081

3 中国气象局,北京 100081

4 四川省气象台,成都 610000

提 要: 基于全球交互式大集合(TIGGE)预报资料,研究利用 TIGGE 全球集合预报大尺度不确定信息,构造区域 GRAPES 集合预报的初值扰动方法和试验方案,并对 2008 年 7 月 22 日发生在黄淮地区的一次暴雨过程进行了集合预报试验。试验结果表明:构造的初值扰动场能够表征 TIGGE 全球集合预报初值中的大尺度不确定信息,区域 GRAPES 集合预报系统可以捕获极端降水天气,对降水预报具有显著的改进作用,集合预报平均及降水概率预报能有效地反映暴雨降水特点,暴雨发生概率较高的区域与实况对应关系较好。积分初期,暴雨的预报一致性(集合离散度)和预报技巧(集合平均预报均方根误差)之间的关系显示了区域 GRAPES 集合预报系统是合理的,但积分后期,由于模式在积分过程中的动力调整作用,减小了初值扰动对预报结果的影响,限制了集合离散度的增长速度。

关键词: TIGGE 资料, GRAPES 模式, 集合预报, 初步试验

The Preliminary Experiment of GRAPES-MESO Ensemble Prediction Based on TIGGE Data

JI Yongming¹ CHEN Jing² JIAO Meiyang³ CHEN Chaoping⁴

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Meteorological Center, Beijing 100081

3 China Meteorological Administration, Beijing 100081

4 Meteorological Observatory of Sichuan Province, Chengdu 610000

Abstract: A heavy rainfall is simulated by GRAPES-MESO model, occurring in Huanghuai area on 22 July 2008 to study the forecast uncertainty and the initial perturbation method when establishing GRAPES-MESO ensemble prediction system (called GRAPES-MEPS) based on TIGGE data. The results suggest that the initial perturbation structure can reflect some information of initial uncertainty. The GRAPES-MEPS has the ability to capture the extreme rainfall event and can significantly improve the forecast skill of heavy rainfall. The ensemble mean can capture some characteristics of the mesoscale heavy rainfall validly. The probability forecast gives the high probability area, where the heavy rainfall occurred actually. The ensemble verification results indicate that the relation between the spread and RMSE demonstrates the rationality of the GRAPES-MEPS during the early integral period, but the impact of the initial perturbation decreases in the subsequent integral period owing to the model dynamic adjustment.

Key words: TIGGE data, GRAPES model, ensemble prediction, preliminary experiment

* 公益性行业(气象)科研专项“面向 TIGGE 的集合预报关键应用技术研究”(GYHY200706001)和“基于多模式集合预报的交互式应用技术研究”(GYHY200906007)共同资助

2010 年 5 月 18 日收稿; 2011 年 2 月 22 日收修定稿

第一作者:纪永明,主要从事数值预报研究工作. Email: j Yongming2030@sina.com

引言

近年来,以提高灾害性强降水预报准确率为目的的区域集合预报已成为一个研究热点^[1-5]。GRAPES(Global/Regional Assimilation and Prediction System)模式^[6]是我国自主研发的数值预报模式,已有部分研究工作表明:GRAPES 模式对灾害性强降水表现出较好的预报性能^[7-8]。GRAPES 模式集合预报技术一直受到我国数值预报研究人员的重视。谭燕等^[9]利用增长模繁殖法(BGM)^[10],开展了区域 GRAPES 模式集合预报技术研究。试验结果表明:获取正确的初值扰动场信息,对构造有效的区域集合预报系统是有帮助的,集合预报能够在一定程度上提高灾害性暴雨降水的预报能力。王太微开展了 GRAPES-BGM 和 GRAPES-ETKF 两套区域集合预报系统的比较试验。结果显示:GRAPES-BGM 和 GRAPES-ETKF 的集合平均预报结果均好于控制预报,降水预报效果与实况较接近。但是,在构造区域 GRAPES 集合预报系统方面还有一些问题值得进一步研究,包括:怎样正确反映 GRAPES 模式的不确定性特征?如何更好地构造 GRAPES 模式的初值扰动方法,特别是如何利用全球集合预报系统提供的初始扰动场信息,增加 GRAPES 集合预报系统的发散度等问题,还需要进一步开展深入研究。

近年来,世界气象组织(WMO)在 THORPEX(The Observing system Research and Predictability EXperiment,全球观测系统研究和可预报性试验)科学计划下成功实施了全球交互式大集合预报系统(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble,简称 TIGGE)。TIGGE 是一个全球各国家和地区的业务数值预报中心的联合行动,它将各主要业务中心集合预报产品集中到一起,示范并评价多模式、多分析和多国集合预报系统。TIGGE 数据库储存了各国家集合预报系统的分析和预报结果。WMO 设立了三个 TIGGE 资料中心,中国气象局(CMA)与欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和美国环境预报中心(NCEP)一起作为 TIGGE 资料交换的三个全球中心,从 2006 年开始我国逐步进入全球交互式大集合 TIGGE 计划当中,成立了 TIGGE 中国中心,并建立了相应的专家组和工作小组,开始全面负责实施中国 TIGGE 计划的推进工作,2007 年中国气象局建立了 TIGGE 资料库,并初步实现

了资料的实时接收、传送。目前已能接收欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、美国环境预报中心(NCEP)、加拿大气象中心(CMC)等国家的集合预报资料,预报时效达到 10~16 天。

在 TIGGE 全球集合预报资料中,我们可以提取各国数值预报中心集合预报初始扰动场信息,代表不同集合预报初值扰动方法的初值不确定性特征,为我们发展区域集合预报提供初值不确定性的来源。开展 TIGGE 集合预报资料的科学研究,为提升我国全球和区域集合预报技术发展和业务应用水平提供了一个非常好的契机。

在发展我国区域 GRAPES 模式集合预报方面,如何利用 TIGGE 全球集合预报资料,获得区域 GRAPES 集合预报的初值扰动场,这一问题值得研究。本文将基于 TIGGE 预报资料,研究利用 TIGGE 全球集合预报的大尺度不确定性信息,构造区域 GRAPES 集合预报的初值扰动方法和试验方案,并对 2008 年 7 月 22 日发生在黄淮地区的暴雨个例进行集合预报试验,分析由 TIGGE 资料驱动区域 GRAPES 模式的有效性。

1 “08.07.22”黄淮暴雨降水过程概况

2008 年 7 月 22—23 日,受高原低涡和西南暖湿气流共同影响,黄淮地区普降暴雨到大暴雨,湖北西部和北部、河南大部、山东南部、江苏北部、安徽北部等地 24 小时累计降水量一般在 100~180 mm 之间,局部地区降水量达 200~240 mm(图 1a)。

21 日 12 时,在 500 hPa 上(图 1b),欧亚中高纬地区为“两槽一脊”环流形势,低槽分别位于巴尔喀什湖附近和我国黑龙江以北地区,高压脊位于蒙古一带,并配合反气旋高压中心;西太平洋和南海上空为副热带高压控制,但强度较弱;在我国境内,甘肃南部有一低压中心,低压槽从甘肃伸展到四川和贵州一带,温度槽落后于低压槽,有冷平流配合。在 850 hPa 上(图 1c),重庆北部受西南低涡控制,低涡中心为低于 1400 gpm 的等高线,其东侧为强盛的西南暖湿气流,最大风速超过 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,向暴雨中心输送了大量水汽,为暴雨产生提供了有利的水汽条件。在地面图上(图 1d),在 30°N 附近有纬向倒槽生成,倒槽内低压中心位于西南地区,中心气压值达 998 hPa,低压中心位置与西南涡一致。同时,冷空气扩散南下进入河套地区,在河套西部地区形成锋生气旋,地面锋生明显。

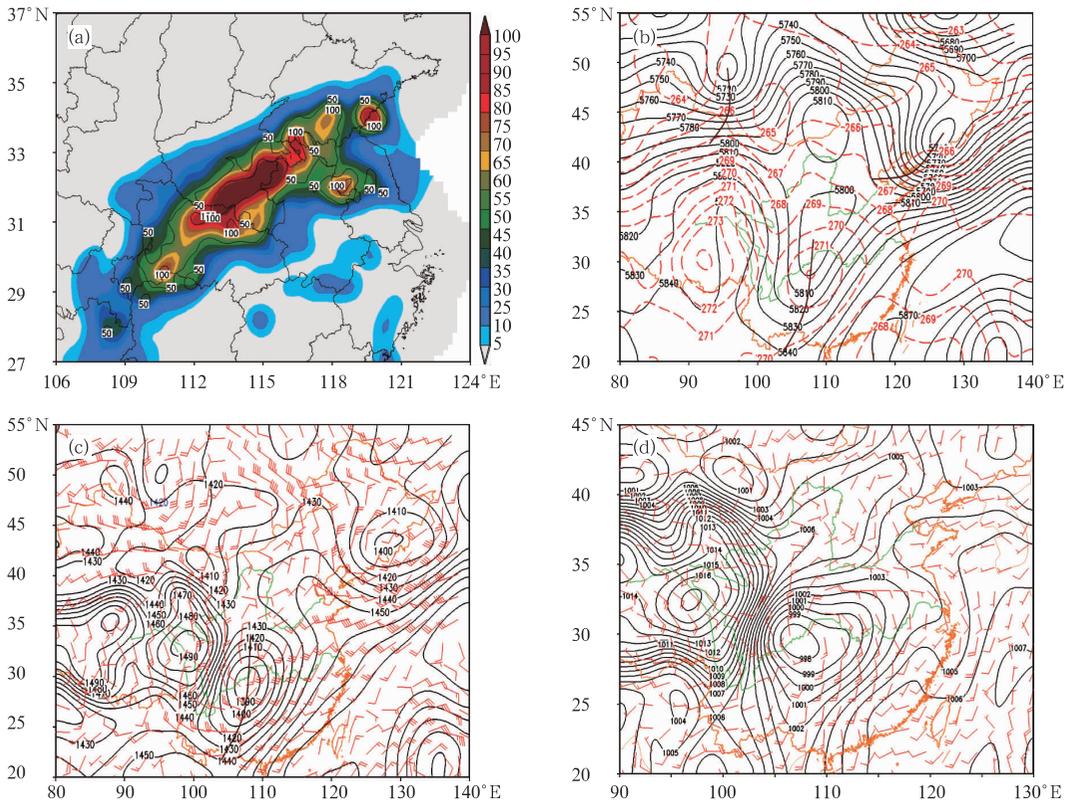


图 1 (a) 2008 年 7 月 22 日 00 时至 7 月 23 日 00 时(世界时,下同)24 小时累计降水量(单位: mm);
 (b) 2008 年 7 月 21 日 12 时 500 hPa 高度场(实线,单位:gpm)和温度场(虚线,单位:K);
 (c) 2008 年 7 月 21 日 12 时 850 hPa 高度场(单位:gpm)和风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);
 (d) 2008 年 7 月 21 日 12 时海平面气压场(单位: hPa)和地面风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 1 A heavy rainfall occurring in the Huanghuai area during 22–23 July 2008.

(a) 24 h total precipitation from 00 UTC 22 to 00 UTC 23 July 2008 (unit: mm) and synoptic situation at 12 UTC 21 July 2008; (b) 500 hPa geopotential height field (unit:gpm) and temperature field (dashed line, unit:K); (c) 850 hPa geopotential height field (solid line, unit:gpm) and wind field (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (d) Sea level pressure (unit: hPa) and surface wind field (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

从地面到高空形势可以看出,此次暴雨过程是在高空槽、西南低涡、切变线和地面倒槽的共同作用下发生的。

2 数值模式与 TIGGE 资料简介

2.1 GRAPES 数值模式简介

本文采用中国气象科学研究院数值预报研究中心等单位联合开发的 GRAPES-MESO(Global/Regional Assimilation and Prediction System)区域模式 3.0 版本,时间积分方案为半隐式半拉格朗日方案,网格设计为等经-纬度格点,水平方向采取 Arakawa-C 格点,垂直方向采取 Charney-Philips 非均匀跳层分布,垂直高度坐标为地形追随坐标。模式物理过程包括云微物理显式降水、次网格积云对流

参数化、长波辐射、短波辐射、陆面过程、近地面过程以及边界层过程。

试验中模式预报区域中心点取为(39.75°N、107.65°E),水平分辨率为 $0.15^\circ \times 0.15^\circ$,水平格点数为 502×330 ,垂直方向为 33 层,模式预报区域覆盖了上述暴雨区域。模式积分开始时间为 2008 年 7 月 21 日 12 时(世界时),时间步长为 180 秒,共积分 72 小时。模式背景场和侧边界条件来自国家气象中心全球中期预报模式 T213 分析场,利用常规探空资料对背景场进行同化和初始化,获得模式初值,模式侧边界条件每 6 小时更新一次。

2.2 TIGGE 集合预报资料简介

表 1 是中国气象局(CMA)、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和美国环境预报中心(NCEP)3 个

TIGGE 中心的集合预报资料概况。如表可见,每个中心的集合预报成员数目不同、分辨率不同、预报时效不同,如集合预报成员数目一列,CMA 为 15 个,ECMWF 为 51 个,NCEP 为 21 个。但每个中心提供的要素是统一的,均提供 8 个等压面(100、250、300、500、700、850、925、1000 hPa)位势高度 H ,比湿 Q ,温度 T ,纬向风 U ,经向风 V ,320 K 等位温面的位涡资料,等位涡面的位温资料,地表的 28 个要素资料。本文将采用 CMA、ECMWF 和 NCEP 3 个 TIGGE 中心的 2008 年 7 月 21 日 12 时(世界时)等压面集合预报资料,以下分别简称 CMA-EPS,ECMWF-EPS,NCEP-EPS。

表 1 3 个 TIGGE 中心集合预报资料概况

Table 1 The outline of ensemble forecast data from three TIGGE centers

数值预报中心	集合成员数目	分辨率	预报时效/d	预报次数
CMA	15	T213L31	10	2
ECMWF	51	T399L62	15	2
NCEP	21	T190L28	16	4

3 基于 TIGGE 资料的 GRAPES 区域集合预报初值扰动方案设计

TIGGE 资料是全球模式集合预报产品,可以反映大尺度系统预报的不确定性特征。本文将通过对 TIGGE 资料进行处理,产生反映大尺度系统预报不确定性特征的 TIGGE 扰动场,并通过一定的数学处理方法,在 GRAPES 模式初值场中加入 TIGGE 扰动场信息,形成区域 GRAPES 集合预报的初始扰动场。以下详细地介绍利用 TIGGE 资料产生 GRAPES 集合预报初始扰动场的数学处理方案:

第一步:利用双线性插值方案,将 CMA、ECMWF、NCEP 的 TIGGE 全球集合预报资料插值成 $0.15^\circ \times 0.15^\circ$ 分辨率的数据。

第二步:挑选最具代表性的 TIGGE 集合预报成员。

TIGGE 集合预报成员与相应的 TIGGE 控制预报在分析时刻的均方差越大,初值扰动场就越具有代表性,越能代表大尺度系统的初值不确定性特征。选取模式积分开始时间 2008 年 7 月 21 日 12 时(世界时)的 500 hPa 高度场,分别计算了各 TIGGE 中心集合预报成员与相应 TIGGE 控制预报在模拟区域内的均方差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X - Y)^2}$$

式中 X 为 TIGGE 集合预报成员, Y 为相应的 TIGGE 控制预报, n 为模拟区域内的格点数。计算结果表明,CMA 集合预报成员的均方差最大,NCEP 次之,ECMWF 最小,分别为 11.0 ~ 17.0 gpm、9.0 ~ 15.0 gpm 和 2.6 ~ 4.3 gpm。Du 等^[9]等人的研究表明:用 8~10 个集合预报成员已经可以提高降水预报技巧,这一点对我们构建区域 GRAPES 集合预报系统是有意义的。因此,为减少计算资源,我们从 3 个 TIGGE 中心集合预报系统中各选取了 5 个均方差较大的集合预报成员,共产生 15 个集合预报成员(如表 2 所示)。对 ECMWF 被选取的第 36、42、16、26 和 4 个集合预报成员,简称为 ECMWF036,ECMWF042,ECMWF016,ECMWF026 和 ECMWF004。对 CMA 和 NCEP 被选取的集合预报成员,以此类推。例如:对 CMA 被选取的第 9 个集合预报成员,简称为 CMA009,不再赘述。

表 2 经挑选的具有代表性的 3 个 TIGGE 中心集合预报成员

Table 2 The ensemble members chosen from three TIGGE centers

集合预报成员	CMA-EPS	ECMWF-EPS	NCEP-EPS
Member1	009	036	018
Member2	008	042	014
Member3	014	016	004
Member4	002	026	015
Member5	011	004	012

第三步:计算大尺度初值扰动场 $dX(x, y, z)$ 。

$$dX(x, y, z) = X(x, y, z) - X_i(x, y, z)$$

式中 $X(x, y, z)$ 为 TIGGE 中心集合预报成员的初值, $X_i(x, y, z)$ 为相应的 TIGGE 控制预报的初值。由上述计算公式可获得各 TIGGE 中心集合预报成员的纬向风 U 、经向风 V 、温度 T 、比湿 Q 以及位势高度 H 在 8 个等压面层(100、250、300、500、700、850、925、1000 hPa)上的大尺度初值扰动场 $dX(x, y, z)$ 。

第四步:将 TIGGE 高度场 H 扰动量转换为 GRAPES 模式扰动气压 P_{ip} 的扰动量。

GRAPES 模式的变量为纬向风 U 、经向风 V 、温度 T 、比湿 Q 以及扰动气压 P_{ip} ,与 TIGGE 资料提供的物理量差异主要表现在,GRAPES 模式是等高面的扰动气压 P_{ip} ,而 TIGGE 资料提供的是等压面的高度场 H 。由 GRAPES 模式系统动力框架可知,扰动气压 P_{ip} 与高度场 H 的关系为:

$$P_{ip} = \frac{R}{c_p} (\text{lev}/1000, 0) \frac{R-c_p}{c_p} (1, 0/100000, 0) \times (-gH)$$

设扰动气压的扰动量为 ΔP_{ip} :

$$\Delta P_{ip} = \frac{R}{c_p} (\text{lev}/1000, 0) \frac{R-c_p}{c_p} (1, 0/100000, 0) (-g)(H_{lev}^{\text{cont}} - H_{lev}^{\text{perb}})$$

式中 c_p 为空气定压比热, R 为干空气比气体常数, g 为重力加速度, $(H_{lev}^{\text{cont}} - H_{lev}^{\text{perb}})$ 为 TIGGE 集合扰动预报与相应 TIGGE 控制预报的高度之差, 即第三步中计算的大尺度扰动场 $dX(x, y, z)$, lev 代表等压面层, $cont$ 代表控制预报, $perb$ 代表集合扰动预报。

第五步: TIGGE 大尺度扰动场 $dX(x, y, z)$ 的垂直插值处理。

通过第三步获得了由 TIGGE 资料产生的大尺度初值扰动场 dX 。由于 TIGGE 的大尺度初值扰动场 $dX(x, y, z)$ 是等压面资料, GRAPES 模式是地形高度追随坐标, 需要将 TIGGE 等压面上的扰动场转换为 GRAPES 模式面上的扰动场。GRAPES 模式面有 33 层等高垂直坐标, 但是 TIGGE 扰动场信息是 8 个等压面层(100、250、300、500、700、850、925、1000 hPa)上的数据。将 8 层 TIGGE 大尺度扰动场加入到 GRAPES 模式面 33 层的初值场中遵循表 3 的对应关系。例如: 对于 GRAPES 模式面的第 1~5 层 (GRAPES 模式面高度为 0~500 m), 采用 1000 hPa 的 TIGGE 扰动场资料, 以此类推, 不再赘述。

表 3 GRAPES 模式面与 TIGGE 扰动场的对应关系

Table 3 The corresponding relation between GRAPES model levels and TIGGE perturbation fields

GRAPES 模式面	TIGGE 扰动场
第 1 层(0 m)至第 5 层(约 500 m)	1000 hPa TIGGE 扰动场
第 6 层(约 800 m)至第 7 层(约 1200 m)	925 hPa TIGGE 扰动场
第 8 层(约 1600 m)至第 10 层(约 2600 m)	850 hPa TIGGE 扰动场
第 11 层(约 3110 m)至第 14 层(约 4860 m)	700 hPa TIGGE 扰动场
第 15 层(约 5500 m)至第 16 层(约 6170 m)	500 hPa TIGGE 扰动场
第 17 层(约 6860 m)至第 19 层(约 8340 m)	400 hPa TIGGE 扰动场
第 20 层(约 9120 m)	300 hPa TIGGE 扰动场
第 21 层(约 9950 m)至第 22 层(约 10790 m)	200 hPa TIGGE 扰动场
第 23 层(约 11670 m)至第 33 层(约 28540 m)	100 hPa TIGGE 扰动场

第六步: 产生 GRAPES 模式面的扰动初值场 $init'(x, y, z)$ 。

$$init'(x, y, z) = init(x, y, z) - dX(x, y, z)$$

其中 $init(x, y, z)$ 为 GRAPES 控制预报模式面初值场, $dX(x, y, z)$ 为 TIGGE 大尺度初值扰动场。

4 区域 GRAPES 模式集合预报试验方案

表 4 是 GRAPES 模式集合预报试验方案。其中控制预报采用国家气象中心 GRAPES-MESO 业务模式系统, 模式背景场和边界条件由国家气象中心的 T213 全球模式产生。按照第 3 部分介绍的扰动初值方案, 从 CMA-EPS, ECMWF-EPS, NCEP-EPS 中分别产生 5 个扰动初值, 总计获得 15 个扰动初值。扰动成员的边界条件与控制预报相同, 未做扰动。为考虑云微物理过程与边界层过程的预报不确定性, 采用了多物理过程组合方案, 将 3 个云微物理参数化方案 (Ncep-3class, Wsm-3scheme, Wsm-6scheme) 与 2 个边界层过程参数化方案 (YSU 方案和 MRF 方案) 进行随机组合, 与上述 15 个扰动初值相对应, 设计了 15 个区域 GRAPES 集合预报成员。对 2008 年 7 月 22 日发生在黄淮地区的一次暴雨过程进行了集合预报试验, 对由 TIGGE 资料驱动的区域 GRAPES 集合预报的有效性进行了详细分析。

表 4 3 个 TIGGE 中心不同集合预报成员所对应的物理过程组合方案

Table 4 The combination schemes of physical processes for different ensemble members chosen from three TIGGE centers

集合成员	云微物理方案	边界层方案	扰动初值
0	Ncep-3class	MRF scheme	控制预报
1	Ncep-3class	MRF scheme	CMA-EPS1
2	Wsm-3scheme	MRF scheme	CMA-EPS2
3	Ncep-3class	YSU scheme	CMA-EPS3
4	Wsm-6scheme	MRF scheme	CMA-EPS4
5	Wsm-6scheme	YSU scheme	CMA-EPS5
6	Ncep-3class	MRF scheme	NCEP-EPS1
7	Wsm-3scheme	MRF scheme	NCEP-EPS2
8	Ncep-3class	YSU scheme	NCEP-EPS3
9	Wsm-6scheme	MRF scheme	NCEP-EPS4
10	Wsm-6scheme	YSU scheme	NCEP-EPS5
11	Ncep-3class	MRF scheme	ECMWF-EPS1
12	Wsm-3scheme	MRF scheme	ECMWF-EPS2
13	Ncep-3class	YSU scheme	ECMWF-EPS3
14	Wsm-6scheme	MRF scheme	ECMWF-EPS4
15	Wsm-6scheme	YSU scheme	ECMWF-EPS5

5 区域 GRAPES 集合预报试验结果

5.1 基于 TIGGE 资料的初值扰动场结构特征分析

选取 TIGGE 资料中 ECMWF 的集合预报成

员,分析其 200 hPa 纬向风 U 、500 hPa 扰动气压 P_{ip} 、850 hPa 温度 T 的初值扰动场的水平结构特征。图 2~图 4 依次给出了 ECMWF 的 3 个集合预

报成员 200 hPa 纬向风 U 、500 hPa 扰动气压 P_{ip} 、850 hPa 温度 T 的初值扰动场。

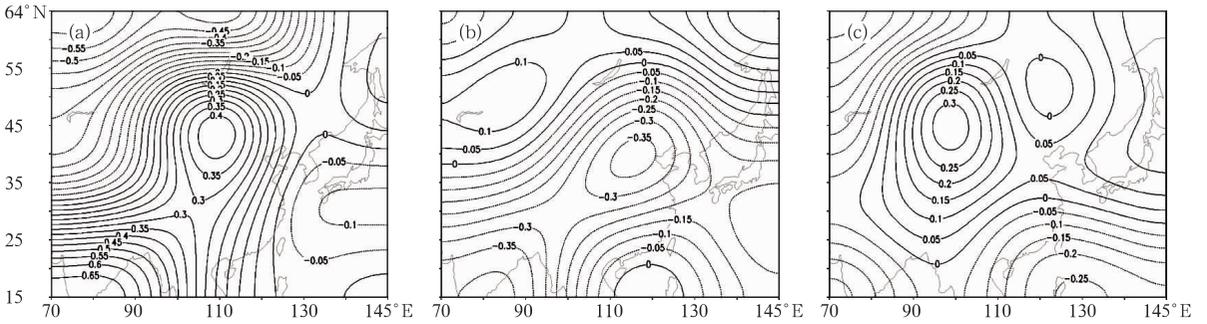


图 2 基于 ECMWF 中心集合预报成员产生的 GRAPES 模式 200 hPa 纬向风 U 的扰动值(单位: $m \cdot s^{-1}$)

(a) ECMWF036; (b) ECMWF042; (c) ECMWF016

Fig. 2 The perturbation values ($m \cdot s^{-1}$) of initial zonal wind field on 200 hPa level for GRAPES ensemble members based on TIGGE-ECMWF initial perturbations

(a) ECMWF036, (b) ECMWF042, (c) ECMWF016

由 200 hPa 纬向风 U 的水平扰动结构(图 2)可以看出,集合预报成员 ECMWF036 在以 $(33^{\circ}N$ 、 $110^{\circ}E)$ 为中心的狭长区域内出现了一个较大的扰动值,最大扰动值达到了 $0.4 m \cdot s^{-1}$,集合预报成员 ECMWF042 的扰动结构特征与集合预报成员 ECMWF036 相似,但一般呈现负的扰动结构,最大扰

动值达到了 $-0.35 m \cdot s^{-1}$;集合预报成员 ECMWF016 以 $30^{\circ}N$ 为分界线,呈现“南负北正”的扰动结构特征,在其以北地区出现正的扰动结构,最大扰动值达到了 $0.3 m \cdot s^{-1}$,在其以南地区出现负的扰动结构,最大扰动值达到了 $-0.25 m \cdot s^{-1}$ 。

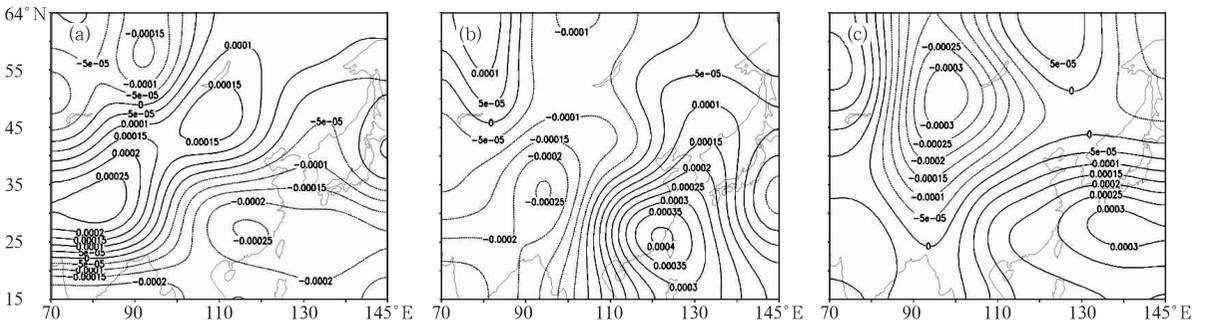


图 3 基于 ECMWF 中心集合预报成员产生的 GRAPES 模式 500 hPa 扰动气压 P_{ip} 的扰动值 ΔP_{ip} (单位: Pa)

(a) ECMWF036; (b) ECMWF042; (c) ECMWF016

Fig. 3 The perturbation values ΔP_{ip} (Pa) of initial disturbed pressure P_{ip} on 500 hPa level for GRAPES ensemble members based on TIGGE-ECMWF initial perturbations

(a) ECMWF036, (b) ECMWF042, (c) ECMWF016

从天气形势上看,在西南地区上空有一低涡存在,蒙古境内、甘肃南部分别存在一个高压中心和低压中心,西北太平洋由副热带高压控制,这些都是产生暴雨的重要天气系统。从 500 hPa 扰动气压 P_{ip} 的水平扰动结构(图 3)可以看出,3 个集合预报成员

在这些区域的水平扰动结构各不相同,以 $110^{\circ}E$ 为分界线,集合预报成员 ECMWF036 的水平扰动呈现“西正东负”的结构特征,扰动中心值为 $-0.00025 \sim 0.00025 Pa$,而集合预报成员 ECMWF042 则呈现“东正西负”的扰动结构特征,其扰动中心值为

-0.00025~0.0004 Pa;集合预报成员 ECMWF016 以 30°N 为分界线,呈现“北正南负”的扰动结构特征,其扰动中心值为-0.0003~0.0003 Pa。

另外,我们还注意到:在西北太平洋上,3 个集合预报成员的扰动强度均较大,集合预报成员 EC-

MWF016 与 ECMWF036 的最大扰动强度在 0.0003~0.0004 Pa 之间,集合预报成员 ECMWF042 的最大扰动强度在 0.00025 Pa 左右。这表明:所选的集合预报成员在较大程度上包含了对西北太平洋副热带高压预报不确定性的表达。

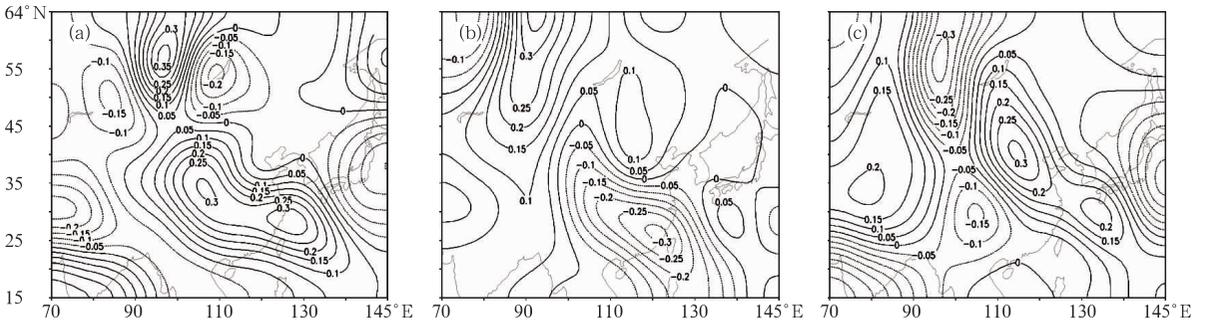


图 4 基于 ECMWF 中心集合预报成员产生的 GRAPES 模式 850 hPa 温度 T 的扰动值(单位:K)

(a) ECMWF036; (b) ECMWF042; (c) ECMWF016

Fig. 4 The perturbation values of the initial temperature (K) on 850 hPa level for GRAPES ensemble members based on TIGGE-ECMWF initial perturbations chosen from the ECMWF center

(a) ECMWF036, (b) ECMWF042, (c) ECMWF016

由 850 hPa 温度 T 的水平扰动结构(图 4)可以看出:以 45°N 为分界线,集合预报成员 ECMWF036 的水平扰动呈现“南正北负”的结构特征,而集合预报成员 ECMWF042 则呈现“南负北正”的扰动结构特征;集合预报成员 ECMWF016 的扰动结构呈现“正-负-正”的纬向变化特征。3 个集合预报成员的扰动强度在-0.3~0.3 K 之间。

初值扰动场较大的相似性将会限制集合预报成员间的离散度的增长,离散度偏小将导致集合预报成员漏报大气真实状态的概率增加。由初始时刻所获得的集合预报成员 200 hPa 纬向风 U 、500 hPa 扰动气压 P_p 、850 hPa 温度 T 的水平扰动结构可以看出:文中所构造的初值扰动场差异较大,可以使集合预报成员能够最大程度的表征初值场的不确定性,可以保证集合预报成员包含大气真实状态的概率增加,这对集合离散度的合理增长有正的影响。

5.2 集合预报试验结果分析

图 5 给出了控制预报与 ECMWF 中心 5 个集合预报成员的 24 小时累积降水预报。与实况(图 1a)对比可以看到:控制预报(图 5a)的强降水范围明显偏小,暴雨中心降水值只有 50 mm 左右,而实况降水强度达到了 100 mm 以上。此外,控制预报漏报了山东南部、江苏北部和安徽北部地区的强降水中心。图 5b~5f 是 ECMWF 中心 5 个集合预

报成员预报的 24 小时累计降水量。由降水预报结果来看,与控制预报(图 5a)相比,集合预报对这次暴雨降水过程的总体预报效果是不错的,集合预报成员能很好地反映出降雨带的走向,都不同程度地对控制预报的暴雨中心降水强度及范围有一定的改善,暴雨中心的降水强度均在 100 mm 以上,某些集合预报成员的降水预报结果与实况非常接近(图 5b、图 5f)。尤其值得注意的是,各集合预报成员对山东南部、江苏北部和安徽北部地区的强降水表现出了一定的预报能力,给出了控制预报中没有反映出来的降水特点,这可以给预报员以很好的指示作用。

图 6、7 分别给出了这次暴雨过程 24 小时累计降水集合预报平均和集合离散度。由图 6 可以看出,各 TIGGE 中心的集合预报平均都模拟出了这次暴雨过程的西南-东北向降雨带,并在河南中部模拟出了一个暴雨中心,但各 TIGGE 中心模拟的暴雨中心降水值差别较大,ECMWF 与 CMA 的集合平均值达到了 100 mm 以上,而 NCEP 的集合平均值只有 50 mm 左右。另外,各 TIGGE 中心的集合平均都在安徽北部模拟出了较强的降水中心,其中,ECMWF 的集合平均还在山东南部模拟出了一个较强的降水中心。因此,可以看出,集合平均的降水预报效果更接近实况,表明集合预报结果优于单一控制预报。

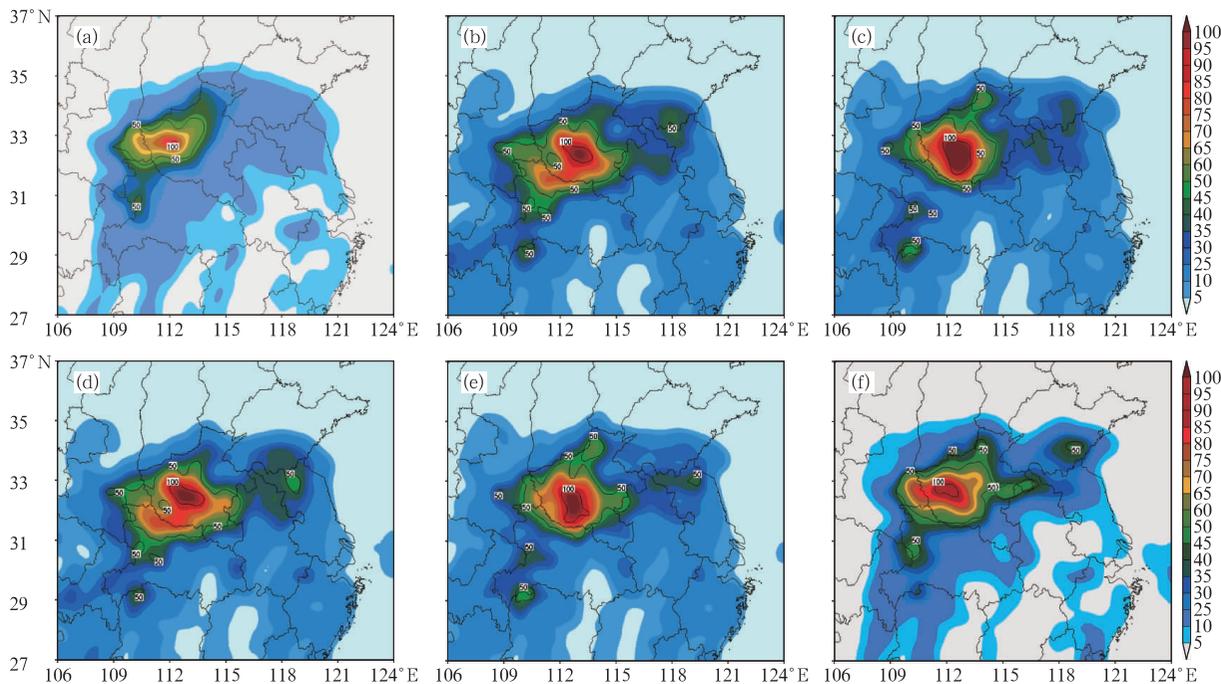


图 5 控制预报(a)与 ECMWF 中心集合预报成员(b~f)的 24 小时累计降水预报(单位: mm)

Fig. 5 The 24 h total precipitation forecast of (a) control forecast and (b~f) ensemble members chosen from ECMWF center (unit: mm)

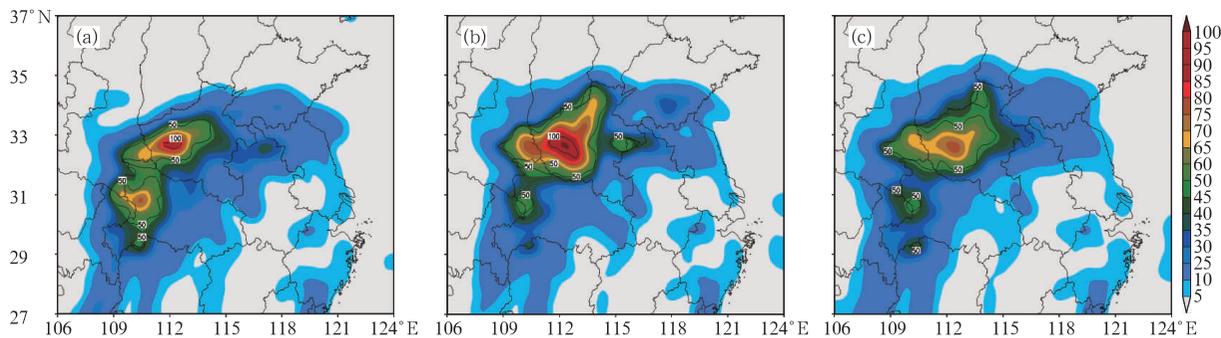


图 6 3 个 TIGGE 中心: (a) CMA, (b) ECMWF, (c) NCEP 给出的 24 小时累计降水集合预报平均(单位: mm)

Fig. 6 The ensemble mean of 24 h total precipitation for (a) CMA, (b) ECMWF, (c) NCEP (unit: mm)

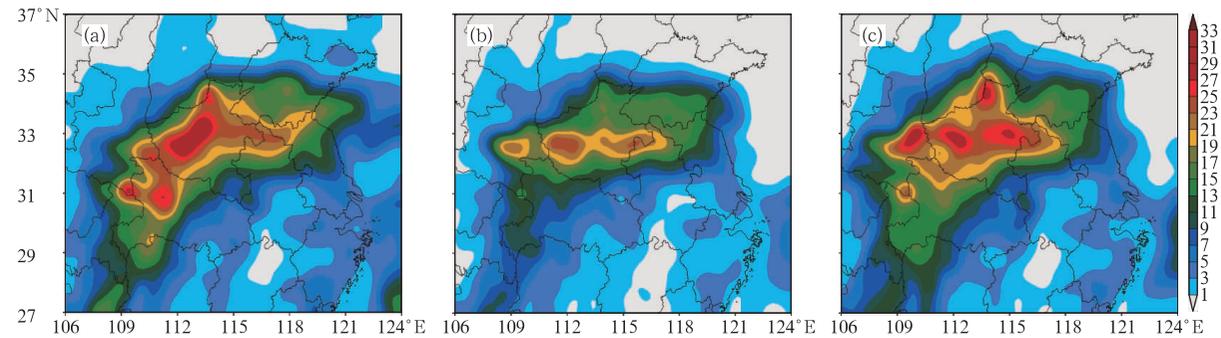


图 7 3 个 TIGGE 中心: (a) CMA, (b) ECMWF, (c) NCEP 给出的 24 小时累计降水集合离散度(单位: mm)

Fig. 7 The ensemble spread of 24 h total precipitation for (a) CMA, (b) ECMWF, (c) NCEP (unit: mm)

集合离散度是预报可信度的一个指标,定义离散度为集合扰动预报与集合平均预报之间的平均距离。集合离散度越大,表示预报不确定性越大。本次试验的集合离散度表明:在各 TIGGE 中心集合预报平均最大降水中心的区域,集合离散度也较大。CMA,ECMWF 和 NCEP 的离散度值一般大于 20 mm,表明集合扰动成员对这些区域暴雨降水量级的预报存在较大差别。

图 8 给出了这次暴雨过程 24 小时累计降水大于 25.0 mm 和 50.0 mm 的概率预报。图中实线区域表示发生概率高于 60%。由图 8b 可以看到,在

大于 50.0 mm 的降水概率预报图上,概率分布外形与降雨带相近,图中概率高于 60% 的区域与图 1a 中实际发生暴雨的区域近于吻合。安徽与江苏北部地区出现暴雨的概率值大于 0.4,表明以上地区出现暴雨的可能性较大,体现了概率预报对强降水预报具有相当高的可信度。由此可见,降水概率预报很好地指示了降水极值区域并给出了高值降水发生的概率,这些预报信息与控制预报是有差异的,如果在这次暴雨预报中参考集合预报结果,将对预报结果产生正面的影响效果。

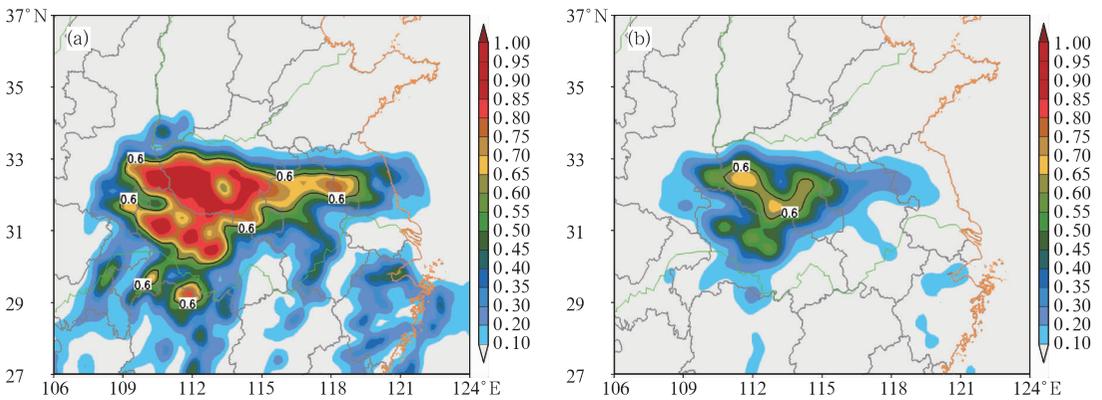


图 8 3 个 TIGGE 中心的 24 小时累计降水(a)大于 25.0 mm 与(b)大于 50.0 mm 的概率预报

Fig. 8 The probability forecast of 24 h total precipitation chosen from the three TIGGE centers

(a) greater than 25.0 mm and (b) greater than 50.0 mm

为定量分析集合预报系统的降水预报效果,计算了 ECMWF 集合预报成员、集合预报平均、控制预报的 6 小时预报的 0.1 mm(小雨)、4.0 mm(中雨)和 13.0 mm(大雨)降水的 TS 值和 BS 值(图 9)。

由图 9 可以看出:对于 0.1 mm 量级的降水,ECMWF 集合预报成员的 TS 值达到 0.2 以上,集合预报平均的 TS 值达到了 0.6 以上;对于 4.0 mm 和 13.0 mm 量级的降水,ECMWF 集合预报成员和集合预报平均的 TS 值较小,但集合预报平均的 TS 值仍然高于大部分集合预报成员的 TS 值。由 BS 值的时间演变可以看到:对于 0.1 mm 量级的降水,集合预报平均以及部分 ECMWF 集合预报成员的 BS 值大于 1.0,说明对于小雨这一量级降水而言,初值扰动方法存在较大的空报;对于 4.0 mm 和 13.0 mm 这两个量级的降水,集合预报平均以及 ECMWF 集合预报成员的 BS 值均小于 1.0,说明对于中雨和大雨这两个量级降水,初值扰动方法存在较大的漏报。由图 9 还可以看出:对于以上 3 个量级的降水,在模式积分过程中,集合预报平均的 TS

值和 BS 值高于大部分 ECMWF 集合预报成员与控制预报。这说明:基于初值扰动方法的集合预报平均的预报结果总体上要优于集合预报的单个成员。

5.3 集合预报检验

图 10 给出了 500 hPa 位势高度与 850 hPa 温度集合离散度与集合平均预报均方根误差的时间演变。由图可以看出,在积分初期,集合离散度要大于或近似等于集合平均预报均方根误差,集合离散度基本满足要求,体现了文中基于 TIGGE 资料构造的区域 GRAPES 集合预报系统具有其合理性;随着模式积分时间向前推进,区域 GRAPES 集合预报系统虽然仍能保持一定的离散度,但集合平均预报均方根误差的增长速度更快,这可能是由于模式在积分过程中的动力调整作用,减小了初值扰动对预报结果的影响。可见,在更长预报时效上,本文由 TIGGE 资料驱动的区域 GRAPES 集合预报系统存在离散度增长速度偏慢的问题,集合离散度还有待于进一步改善。

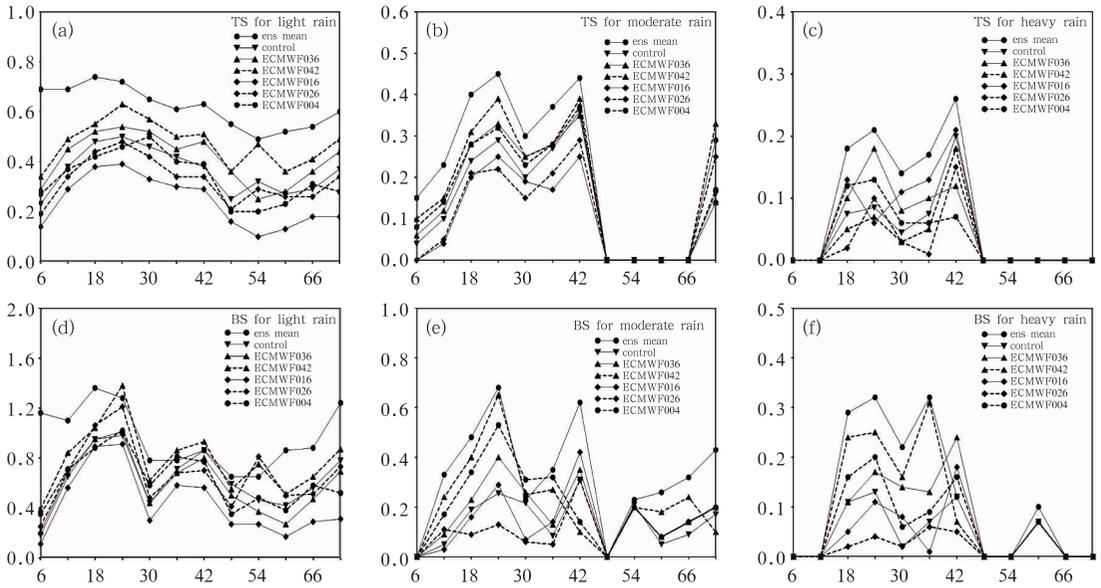


图 9 ECMWF 中心 5 个集合预报成员、集合预报平均(ens mean)、控制预报(control)6 小时分级降水 TS 评分(a,b,c)与 BS 评分(d,e,f)时间演变
 (a), (d) 大于 0.1 mm; (b), (e) 大于 4.0 mm; (c), (f) 大于 13.0 mm
 Fig. 9 The time-evolution of TS and BS of 6 h precipitation (a,d) greater than 0.1 mm, (b,e) greater than 4.0 mm, (c,f) greater than 13.0 mm for ensemble members chosen from ECMWF center, ensemble mean (ens mean), and control forecast (control)

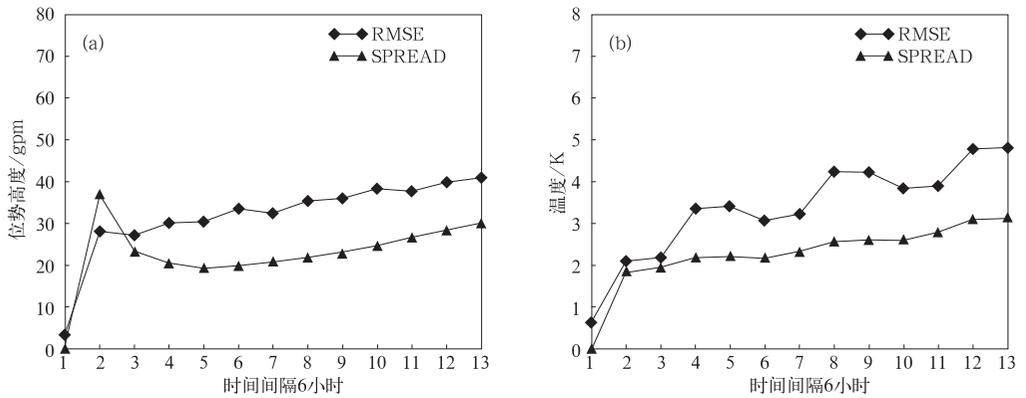


图 10 500 hPa 位势高度(a)与 850 hPa 温度(b)集合离散度与集合平均预报均方根误差的时间演变
 Fig. 10 The time-evolution of ensemble spread (SPREAD) and root mean square error (RMSE) of (a) 500 hPa geopotential height and (b) 850 hPa temperature. (x-coordinate at intervals of 6 h)

6 小结与讨论

本文基于 TIGGE 资料,研究了区域 GRAPES 集合预报的初值扰动方法,并对 2008 年 7 月 22 日发生在黄淮流域的大暴雨过程进行了集合预报试验,检验了这种方法的合理性及有效性,得到以下主

要结论:

(1) 基于 TIGGE 资料构造的初值扰动场差异较大,使得集合扰动成员能够最大限度地表征初值场的不确定性,这对集合离散度的合理增长有正的影响,保证了集合扰动成员包含大气真实状态的概率增加,提高了区域 GRAPES 集合预报系统捕获极端降水天气的能力。

(2) 在降水预报方面,相对于单一确定性预报,区域 GRAPES 集合预报系统对降水预报具有显著的改进作用。集合平均预报及降水概率预报均能够有效地给出控制预报中没有反映出来的中尺度降水特点,强降水发生概率较高的区域与实况对应关系较好,概率预报结果的可信度较高。

(3) 总体而言,集合离散度随时间增长。积分初期,暴雨的预报一致性(集合离散度)和预报技巧(集合平均预报均方根误差)之间的关系显示了本文基于 TIGGE 资料构造的区域 GRAPES 集合预报系统是合理的,但积分后期,由于模式在积分过程中的动力调整作用,减小了初值扰动对预报结果的影响,限制了集合离散度的增长速度。

本文只是针对一个暴雨个例展开讨论,对本次试验的分析和检验工作只是初步进行的,若将该方法应用于业务预报中还需要更多的研究和试验,有待今后进一步开展。

参考文献

- [1] Toth Z. Meeting summary: Ensemble forecasting in WRF[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2001, 82(4): 695-697.
- [2] 陈静, 陈德辉, 颜宏. 集合数值预报发展与研究进展[J]. 应用气象学报, 2002, 13(4): 497-507.
- [3] 李俊, 纪飞, 齐琳琳, 等. 集合数值天气预报的研究进展[J]. 气象, 2004, 31(2): 3-7.
- [4] 杜钧, 陈静. 单一值预报向概率预报转变的基础: 谈谈集合预报及其带来的变革[J]. 气象, 2010, 36(11): 1-11.
- [5] 刘家峻, 张立凤, 关吉平, 等. 集合预报产品在台风麦莎预报中的应用[J]. 气象, 2010, 36(5): 21-31.
- [6] 陈德辉, 沈学顺. 新一代数值预报系统研究进展[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 773-777.
- [7] 李勇, 王雨. 2007 年夏季 GRAPES-MESO 15 及 30 km 模式对比检验[J]. 气象, 2008, 34(10): 81-89.
- [8] 徐双柱, 张兵, 谌伟. GRAPES 模式长江流域天气预报的检验分析[J]. 气象, 2007, 33(11): 65-71.
- [9] 谭燕, 陈德辉. 基于非静力模式物理扰动的中尺度集合预报试验[J]. 应用气象学报, 2007, 18(3): 398-407.
- [10] Toth Z, Kalney E. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method[J]. Mon Wea Rev, 1997, 125(6): 3297-3319.
- [11] Du J. Short-range ensemble forecasting of quantitative precipitation[J]. Mon Wea Rev, 1997, 125(10): 2427-2459.