

黄红艳, 齐琳琳, 刘健文, 等. 2016. 多物理 ETKF 在暴雨集合预报中的初步应用 [J]. 大气科学, 40 (4): 657–668. Huang Hongyan, Qi Linlin, Liu Jianwen, et al. 2016. Preliminary application of a multi-physical ensemble transform Kalman filter in precipitation ensemble prediction [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (4): 657–668, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1508.14308.

多物理 ETKF 在暴雨集合预报中的初步应用

黄红艳¹ 齐琳琳² 刘健文² 黄江平² 李崇银^{3,4}

¹ 西昌卫星发射中心, 四川西昌 615000

² 北京航空气象研究所, 北京 100085

³ 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

⁴ 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101

摘 要 基于集合转换卡尔曼滤波 (ETKF) 的初值扰动方法是目前集合预报领域热点方法之一, 但应用在短期集合预报中仍存在离散度不够、误差较大等问题。考虑到在区域短期集合预报中, 模式不确定性和边界不确定性的影响不能忽略, 本文尝试在 ETKF 生成分析扰动的过程中, 同时考虑初值不确定性、物理不确定性与边界不确定性, 进而构建多初值、多物理、多边界 ETKF 集合, 并以 2010 年 9 月 30 日到 10 月 8 日海南岛特大暴雨作为研究个例, 对其在暴雨集合预报中的应用展开初步研究, 重点分析多种物理参数化过程对预报结果的影响。结果表明, 多物理过程的 ETKF (多物理 ETKF) 和单物理过程的 ETKF (单一 ETKF) 均优于对照预报, 多物理 ETKF 优势更加明显, 其均方根误差、离散度等指标均得到很好的改善; 对于降水采用 SAL 方法进行检验, 发现多物理 ETKF 对于降水位置的预报有明显的改善, 对于特大暴雨的强度预报也略有改善。研究表明, 在 ETKF 初值扰动中加入多种物理过程, 可以有效改善短期集合的离散度, 提高预报准确率, 有良好的发展前景和应用潜力。

关键词 集合转换卡尔曼滤波 (ETKF) 集合预报 物理不确定 暴雨预报

文章编号 1006-9895(2016)04-0657-12

中图分类号 P456

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1508.14308

Preliminary Application of a Multi-Physical Ensemble Transform Kalman Filter in Precipitation Ensemble Prediction

HUANG Hongyan¹, QI Linlin², LIU Jianwen², HUANG Jiangping², and LI Chongyin^{3,4}

¹ Xichang Satellite Launch Center, Xichang Sichuan 615000

² Institute of Aviation Meteorological Research, Beijing 100085

³ State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

⁴ Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

Abstract The optimal initial perturbation method using the ensemble transform Kalman filter (ETKF) is a point of intense popular interest in ensemble prediction. However, problems remain with respect to short-term ensemble prediction, such as insufficient ensemble spread, too large a prediction error, and so on. In this study, multi-physical

收稿日期 2014-11-03; 网络预出版日期 2015-08-17

作者简介 黄红艳, 女, 1989 年出生, 硕士研究生, 主要从事集合天气预报研究。E-mail: huanghongyan2012@126.com

通讯作者 李崇银, E-mail: lcy@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家高技术研究发展计划项目 2012AA091801, 国家自然科学基金项目 41205044、41205073、41275099

Funded by National High-tech R&D Program of China (Grant 2012AA091801), National Natural Science Foundation of China (Grants 41205044, 41205073, and 41275099)

parameterizations and boundary perturbations were introduced into the initial ETKF, and a heavy rainfall event that occurred in Hainan Province during 30 September to 6 October 2010 was simulated, as an example, using the single-physical ETKF and multi-physical ETKF in WRF3.5. The main results were as follows: All ensemble schemes outperformed the contrast forecast, with the multi-physical ETKF found to be the best. The RMSE and ensemble spread were well improved. For the multi-physical ETKF, the improvement in the location of heavy rain was obvious. The results indicate that the introduction of a variety of physical processes in the initial perturbations for the ETKF could significantly amplify the ensemble spread and improve the ensemble forecast of each quantity. The application of the physical ETKF method may have great potential in precipitation ensemble prediction.

Keywords Ensemble transform Kalman filter, Ensemble forecast, Physical perturbation, Precipitation prediction

1 引言

暴雨是影响中国的主要灾害性天气, 由于其过程非常复杂、发生具有很多的不确定性以及模式无法准确描述降水过程等原因, 使得降水预报尤其是大雨以上的强降水预报难度较大、准确率较低, 至今仍是世界天气预报的难点问题(陶诗言等, 2001; 赵思雄和孙建华, 2013)。近年来, 随着集合预报研究的不断深入及其在业务预报中的成功应用(Stensrud et al., 1999; Saito et al., 2012), 该方法成为国际上公认的提高暴雨可预报性最具发展前途的有效途径之一。

基于集合转换卡尔曼滤波(ETKF)的初值扰动方法是现在集合领域较新的一种初值扰动方法, 该方法基于集合变换思想, 可以直接得到预报误差协方差的减少量, 且具有卡尔曼滤波流依赖的特性, 被认为是目前理论上最优的初值扰动方法之一。该方法最早由 Bishop et al. (2001) 提出, 用于适应性观测领域。Wang and Bishop (2003) 将其用于集合初值扰动, 并同业务中使用的增长模繁殖法(BGM)进行比较, 发现基于 ETKF 得到的分析扰动能够反应观测资料的密度和准确率, 在相当的数量上保持集合扰动的不相关, 且扰动相互正交, 很好地解决了 BGM 中分析误差方差固定不变、扰动不正交等缺陷。Wei et al. (2006) 进一步在 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 业务环境预报中对 ETKF 与 BGM 进行比较, 所得结论与 Wang and Bishop (2003) 基本一致, ETKF 产生的扰动具有更大的自由度。同时, 随着 ETKF 方法研究的不断深入, 该方法也得到进一步的完善。Wang et al. (2004) 从理论角度证明和正负扰动方法相比球面中心化扰动方法更适合 ETKF。Wang et al. (2007) 在 ETKF 中引入一个小参数, 使其扰动离散度与真实大气更接近。目前, 英国气象局也将该方法应用

在业务全球集合预报(Bowler and Mylne, 2009)以及区域集合预报系统中(Bowler et al., 2009)。

在中国, 不少学者也展开了对 ETKF 初值扰动方法在区域集合预报系统中的应用研究。马旭林等(2006)基于 ALADIN 模式, 对 ETKF、BGM 和奇异向量(SV)三种初值扰动方法进行比较, 结果表明在较少集合成员的试验中, ETKF 方案相对于 BGM 与 SV 初始扰动方案表现出了一定的优越性。田伟红和庄世宇(2008)、马旭林等(2008)以及龙柯吉等(2011)基于 GRSPES-Meso 区域模式对 ETKF 初值扰动方法展开深入研究, 揭示了 ETKF 初值扰动方案的基本性质及利用 ETKF 方法进行区域集合预报的可行性。陈超辉(2010)和陈超辉等(2013)通过理论和实际应用揭示了 ETKF 在短期集合预报中的应用前景, 并将其延伸到混合资料同化领域。王太微等(2014)对比分析 GRAPES_ETKF 和 GRAPES_BGM 两个中尺度集合预报系统, 表明 ETKF 的集合离散度和特征值分布优于 BGM 方法, 但对于降水结果 TS 评分等的比较上来看, BGM 的预报结果优于 ETKF。随着研究的不断深入, ETKF 在实际应用中的一些不足也显现出来, 大量结果表明对于区域集合预报, 仅包含初值不确定的 ETKF 初值扰动方法仍存在离散度不够, 误差较大等问题。

近年来, 有学者结合区域短期集合预报的特点, 将物理不确定与边界不确定引入 ETKF 中。Peffer (2011) 在其博士论文中研究了在 ETKF 中引入多种物理过程对于混合资料同化的影响, 发现与单一物理过程的 ETKF 集合相比, 多物理过程的 ETKF 集合的集合均值更加准确, 集合离散度、泰勒分布等均有明显的改善。张涵斌等(2014)基于 GRAPES-Meso 集合预报系统设计了三种集合方案——多初值、多初值多物理、多初值多物理多边值, 结果表明引入物理参数方案扰动及边界条件扰动

能显著提高集合离散度,改善各物理量场的预报效果,并且多初值多物理多边界预报效果最好。在该试验中,三种方案的初始场均由 ETKF 方法生成,在预报中再引入多种物理参数化方案和边界扰动。也就是说该试验在生成分析扰动的过程中,仅考虑了初值的不确定,如果在 ETKF 生成分析扰动的过程中,同时考虑初值不确定、物理不确定与边界不确定对于预报结果又会带来怎样影响,能否有效提高暴雨预报准确性、增加集合离散度呢?为此,本文尝试在 ETKF 生成分析扰动的过程中,同时考虑初值不确定、物理不确定与边界不确定,然后构建多初值、多物理、多边界 ETKF 集合,以 2010 年 9 月 30 日到 10 月 8 日海南岛特大暴雨作为研究个例,对其在暴雨集合预报中的应用展开研究,重点对比分析多物理过 ETKF 集合(以下简称多物理 ETKF)与单物理过程的 ETKF 集合(以下简称单一 ETKF)的差异,为更准确地预报暴雨提供科学的理论依据。

2 试验方案设计

2.1 模式、资料与个例简介

本文选取 2010 年 9 月 30 日到 2010 年 10 月 8 日海南岛特大暴雨作为研究对象。此次暴雨根据成因和降水强度可以分为三个阶段,三个阶段所进行的模拟其结果基本相似,为节省篇幅本文仅以降水最强的第二阶段为例进行讨论。第二阶段为 10 月 3 日到 6 日,此次全海南岛普降暴雨至大暴雨,甚至达到特大暴雨(强降水中心集中于东部沿海),给

当地经济造成重大损失。就 5 日 00 时(协调世界时,下同)至 6 日 00 时 24 h 累计降水,全岛降雨量普遍超过 50 mm,接近一半地区的降雨量达到 100 mm 的大暴雨量级,全岛降雨量自西向东逐渐增多,以东部沿岸最多,达到 250 mm 的特大暴雨级别,其中琼海站 24 h 降雨量达到 701.9 mm,万宁站雨量为 392.2 mm,定安站为 280.9 mm(图 1a)。

本文采用 WRF V3.5 模式,模式分辨率为 12 km,模拟区域如图 1b 所示,模拟区域格点数为 262×184 ,垂直方向分为 42 层,模式顶为 10 hPa,投影方式为 Mercator,降水检验区为海南岛。

模式背景场和边界条件均采用 NCEP 的 FNL 再分析资料,同时加入 RTG_SST 海温资料,他们的分辨率均为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$;观测资料选取 NCEP 全球观测资料,该资料包含 NCEP 全球卫星通行系统(GTS)提供的陆地表面、海洋表面、探空和飞机探测资料,US 雷达获取的风场、SSM/I 的海洋风和 TCW 资料以及美国国家环境卫星、数据和信息局(NESDIS)提供的卫星风场资料,时间间隔为 6 h;降水资料为中国逐日网格降水资料,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,该资料从实时降水水库提取全国 2400 多台站(包括国家气候观象台,国家气象观测一级站、二级站)逐日降水量处理得到。

2.2 方案设计

本文共进行三组试验,分别为对照试验、单一 ETKF 试验和多物理 ETKF 试验,分别记为 K、I、P 试验。对照试验为确定性试验,选取了 Kain-Fritsch 对流参数化过程,Yonsei University 边界层参数化

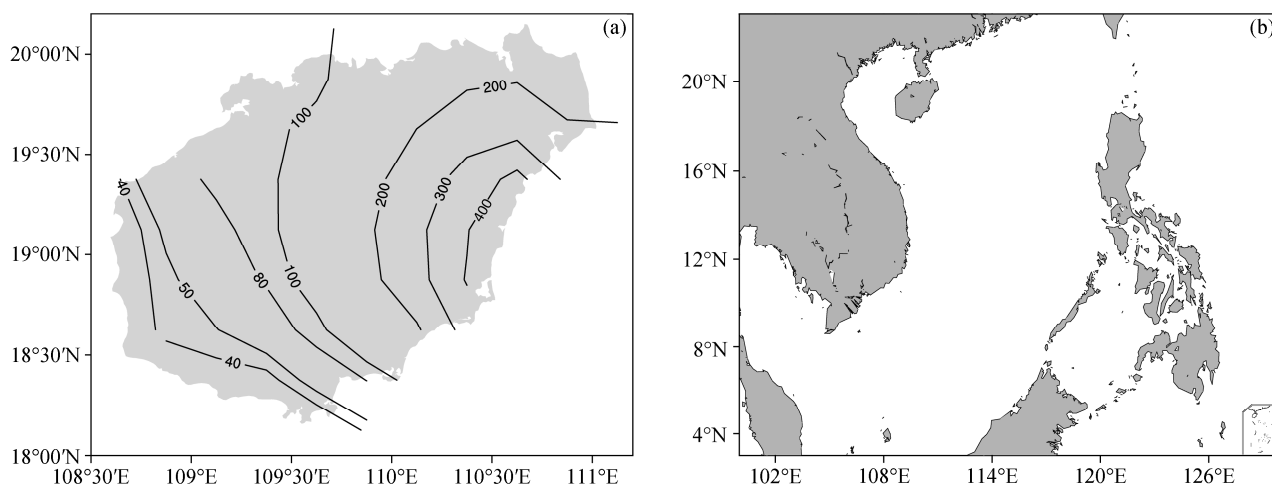


图 1 (a) 2010 年 10 月 5 日 00 时到 6 日 00 时 24 h 地面观测的累计降水(单位: mm); (b) 试验模拟区域范围

Fig. 1 (a) 24 h accumulative precipitation (units: mm) from 0000 UTC 5 to 0000 UTC 6 October 2010; (b) simulation area

方案, 积分时间为 2010 年 10 月 3 日 00 时至 6 日 00 时, 共 72 小时, 侧边界每 6 h 更新一次。

单一 ETKF 共 20 个集合成员, 均通过在分析场(再分析资料)上叠加随机扰动得到, 物理方案与控制试验相同; 多物理 ETKF 试验分为 4 组, 每组采用相同的物理参数化方案, 每组参数化方案对应 5 个随机扰动, 共 20 个集合成员。本文的物理过程扰动采用积云对流参数化和边界层参数化方案的组合, 其余物理过程与控制试验一致(表 1)。

在区域集合预报中, 侧边界的不确定也是影响预报效果的重要因素。所以, 本文中单一 ETKF 与多物理 ETKF 集合均采用相同的方法引入侧边界扰动, 其做法类似于 WRFDA(WRF 模式中的同化模块)中的侧边界更新, 即利用各扰动成员相邻 6 h 边界场的差异作为侧边界的扰动。上述两组集合试验的积分方案也相同, 前 24 h 每 6 h 进行一次 ETKF 扰动更新, 到 4 日 00 时, 再连续积分 48 h, 侧边界每 6 h 更新一次, 且均为扰动后的边界条件。本次试验中, ETKF 主要对纬向风, 经向风, 垂直风, 位势, 位温, 水汽混合比和干空气质量七个物理量进行更新。

综上所述, 在本文的试验中, 单一 ETKF 在生成分析扰动时, 考虑了初值和边界不确定的影响, 多物理 ETKF 则同时考虑了初值、物理和边界不确定的影响, 对比分析单一 ETKF 与多物理 ETKF 的结果, 可以很好的检验多种物理过程对于暴雨集合预报的影响。

表 1 多物理 ETKF 物理参数化组合
Table 1 Multi-physical ensemble transform Kalman filter (ETKF) parameterization combination

组合编号	积云对流参数化方案	边界层参数化方案
1	KF 方案	YSU 方案
2	KF 方案	MYJ 方案
3	BMJ 方案	YSU 方案
4	BMJ 方案	MYJ 方案

注: KF 表示 Kain-Fritsch; BMJ 表示 Betts-Miller-Janjic; YSU 表示 Yonsei University; MYJ 表示 Mellor-Yamada-Janjic。

3 模拟降水结果的比较检验

降水预报的准确与否是衡量数值模拟效果的一个重要方面, 为了客观定量分析降水预报准确率, 本文选取 SAL 方法(Wernli et al., 2008)对降水结果进行检验。此方法以研究范围内的降水为目标物, 并根据分布情况将此范围内的降水主体划分

为不同的降水个体, 从总雨带及其内部结构两个方面, 对雨带的预报从强度(A)、位置(L)、结构(S)三个降水预报的关键因素进行效果检验, 方法设计科学, 与预报员和科研人员的分析思路一致, 可很好地解决了 TS 评分和 ETS 评分中缺乏天气学意义等不足, 结果更加可信。SAL 检验结果为 S、A、L 三个检验数值, 值域范围分别为[-2, 2]、[-2, 2]、[0, 2], 数值意义明确, 判断方法简单。对于三个数值, 绝对值越小, 预报效果越好, 并且三个指标中对降水预报效果指示意义最大的为 L 检验值, L 值越小, 预报效果好的可能性越大, A 值其次, S 值再次, 具体原理请参见文献 Wernli et al. (2008) 和公颖 (2010)。

图 2 给出了集合均值 2010 年 10 月 5 日至 6 日 24 h 累计降水的 SAL 检验结果。由图可以看出, 此次特大暴雨, 对于 L, 多物理 ETKF 明显优于对照试验和单一 ETKF; 对于 A, 三组试验值均较大, 多物理 ETKF 与另外两组试验结果持平; 对于 S, 对照试验较小。这些结果说明, 多物理 ETKF 对于降水的位置有显著的改善, 但对于特大暴雨, 预报的降水强度仍然偏小, 范围偏大。同样, 对 48 h 以及 72 h 的累计降水作相同的检验分析(图略), 所得结论与对 24 h 的检验结果基本一致。这种降水强度预报的偏弱现象, 一般是多成员集合预报的常见问题, 因为每个预报难于在每个点都有相同量值的结果, 集合时往往会将峰值平均掉。

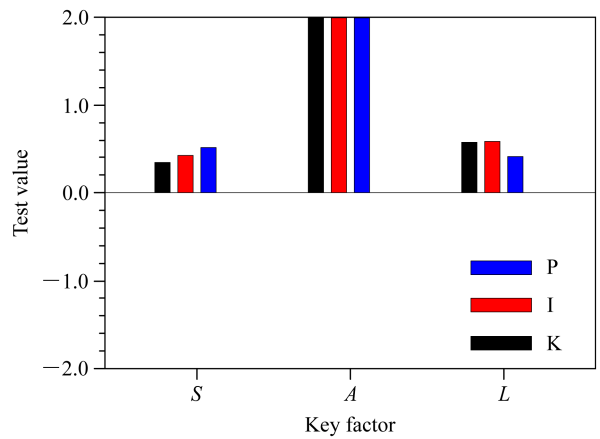


图 2 2010 年 10 月 5 日到 6 日 24 h 累计降水量的 SAL 检验。黑色为对照试验(K), 红色为单一 ETKF 试验(I), 蓝色为多物理 ETKF 试验(P)

Fig. 2 Test SAL (characters S, A, and L represent structure, amplitude, and location of rain belt) of 24-h accumulative precipitation from 0000 UTC 5 Oct 2010 to 0000 UTC 6 Oct 2010. Black, red, and blue bars represent contrast test (K), single-physical ETKF test (I), and multi-physical ETKF test (P), respectively

4 集合预报比较检验

对集合预报的检验评价主要是针对它的以下两个属性: 可靠性和分辨能力。为全面衡量 ETKF 集合预报的效果, 本文采用多种检验方法, 主要包括集合均方根误差(RMSE)和集合离散度(spread)、Talagrand 分布、能量离散度以及集合扰动与预报误差相关分析(PECA), 从多角度综合分析初值 ETKF 和物理 ETKF 集合的差异。

4.1 均方根误差和离散度检验

集合平均是对集合成员预报值做简单的数学平均, 是集合预报最初级的应用。集合平均可以过滤掉每个成员的不可预报因素, 给出总体的预报趋势。将集合平均的均方根误差与对照预报的均方根误差进行对比, 可以比较直观地看出集合预报系统

相对于对照预报是否有所改进。集合离散度是一种常用的衡量集合预报相对于集合平均的不确定性的检验指标。一个好的集合预报系统, 其成员间的离散度和集合平均预报均方根误差的大小应该大体相当, 这样才能保证集合成员数目有限时, 有比较大的可能把真实大气包含在成员集合当中。

图 3 给出三组试验 2010 年 10 月 5 日 00 时(48 h 预报结果)集合平均 RMSE 和离散度的垂直变化。由图 3 可知, 对于位势高度(H)、相对湿度(RH)、纬向风(U)、温度(T)四个物理量, 单一 ETKF 和多物理 ETKF 与对照预报相比都有一定的改善, 多物理 ETKF 表现最优, 特别是中上层的 H , 以及中下层的 T 、 U 。图 4 给出了三组试验集合平均 RMSE 和离散度随预报时间的演变。由图 4 知, 多物理 ETKF 的 RMSE 始终小于单一 ETKF 和对照试

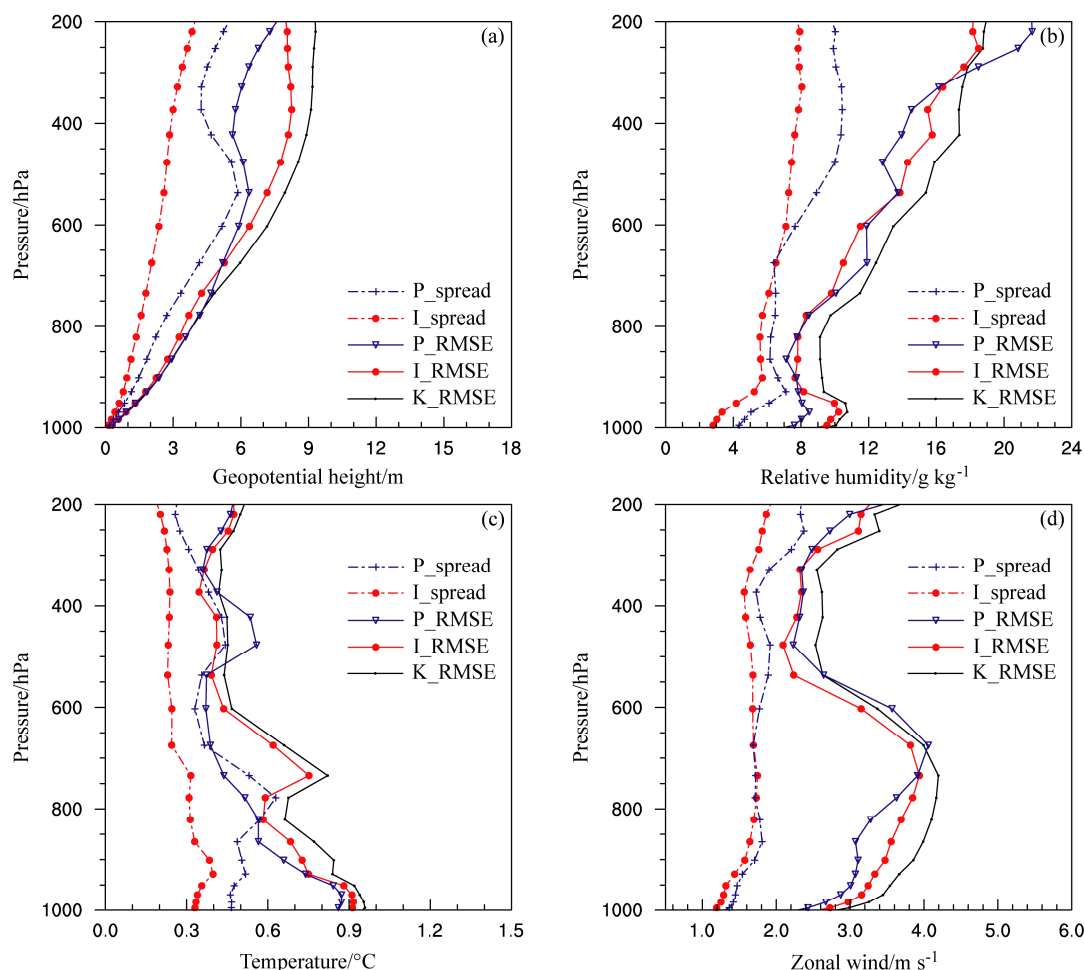


图 3 2010 年 10 月 5 日 00 时(48 h 预报)集合平均 RMSE (实线)、离散度(虚线)垂直变化: (a) 位势高度; (b) 相对湿度; (c) 温度; (d) 纬向风。黑色为对照试验(K), 红色为单一 ETKF 试验(I), 蓝色为多物理 ETKF 试验(P), 下同

Fig. 3 Vertical distribution of RMSE (solid line) and spread (dashed line) at 0000 UTC 5 Oct 2010 (48 h forecast): (a) Geopotential height (GH); (b) relative humidity (RH); (c) temperature; (d) zonal wind. Black, red, and blue lines represent contrast test (K), single-physical ETKF test (I), and multi-physical ETKF test (P), respectively, the same below

验,并且随着预报时间的增加优势更加明显。对于离散度,单一 ETKF 较小,且随时间增加无增长趋势;多物理 ETKF 在 20 h 以后,随着预报时间增长离散度呈增大趋势,这和张涵斌等(2014)的结论一致。在 20 h 以前,对于多物理 ETKF,500 hPa 位势高度 H 的离散度相对高于 RMSE。应该说,在积分初期集合离散度大于或近似等于集合平均 RMSE 均是合理的。因为在积分初期,模式属于适应调整阶段,随着模式积分时间的向前推进,可能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,因此模式平均预报 RMSE 增长相对较快。相比较而言,多物理 ETKF 集合离散度随时间增长明显,相对于单一 ETKF 保持着较好的离散度。图 5 和图 6 进一步给出离散度与 RMSE 的比值,可以看到两个集合均值的比值基本都小于 1,说明离散度仍然小于均方根误差,同时多物理 ETKF 的比值更接近 1。

除了考虑集合均值的表现,各个集合成员的表现同样值得关注。图 7 和图 8 给出了 2010 年 10 月 5 日 00 时两种 ETKF 方案各集合成员的 RMSE。由图可知,两种方案集合均值都优于大部分集合成员,多物理 ETKF 集合均值优势更明显,且多物理 ETKF 集合成员间的差异更为显著,特别是位势高度和温度。同时,不同物理量受参数化影响不同,位势高度和温度受积云参数化方案和边界层方案影响更明显。

4.2 Talagrand 分布检验

Talagrand 分布图是对集合离散度和系统可靠性的检验。当每个柱型的高度相同时,集合预报系统的离散度最好;当柱型有明显的倾斜,即呈“L”或反“L”型,说明集合存在系统性的偏差;如果呈“U”分布,说明集合系统的离散程度不够,反之呈倒“U”型分布时,集合系统的离散度过大。

图 9 图给出 24 h、48 h、72 h 预报结果的 Talagrand 分布,预报量为 850 hPa 纬向风。由图可知,单一 ETKF 离散度不足,呈“U”分布,多物理 ETKF 分布较为平缓,离散度得到明显的改善,并且,随着时间的增长,多物理 ETKF 扰动集合子空间各方向上方差维持较好。多物理 ETKF 对于动力场预报的离散度有较大的改善,其他物理量和其他层次,结果类似(图略)。

4.3 能量离散度分析

ETKF 初值扰动将预报扰动变换为分析扰动的

过程中,融入了观测提供的新信息,从而减小预报扰动误差协方差。与此同时,当集合成员数较小时,ETKF 得到的分析扰动协方差无法达到真实的分析误差协方差的量级,此时引入放大因子使分析扰动成员的协方差与控制预报分析场的误差方差大体相当。下面对预报和分析扰动的能量离散度进行分析,对比两者之间的差异。

本文选取扰动总干能量进行分析,其定义为

$$E(i, j, k) = 0.5 \times [u'^2(i, j, k) + v'^2(i, j, k) + c_p / T_r T'^2(i, j, k)], \quad (1)$$

其中, u' 、 v' 和 T' 分别代表水平风场和温度场扰动; $c_p = 1004.0 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 为干空气定压比热; T_r 为参考温度(即验证区域内 FNL 平均温度廓线); i, j, k 分别水平和垂直格点维数。本文试验从 2010 年 10 月 3 日 00 时积分至 6 日 00 时,共 72 小时。图 10 给出了前 24 h (ETKF 扰动更新阶段) 预报和分析扰动能量离散度垂直分布,这里的分析场资料选用 FNL 再分析资料。由图可知,6 h 和 18 h 两种方案分析扰动与预报扰动的误差协方差基本一致,也就是说,在 6 h 和 18 h ETKF 扰动更新的作用不明显,这一方面可能是因为 ETKF 的更新与观测资料的密度、分布和质量有密切的关系而 6 h 和 18 h 没有常规探空观测;另一方面也说明更新与其时间间隔有关,这从某种角度可以说明,对于 ETKF 初值扰动更新的间隔可以选取 12 h。从 12 h 和 18 h 来看,对于单一 ETKF,分析扰动误差协方差略小于预报扰动误差协方差,而多物理 ETKF 分析扰动误差协方差和预报扰动误差协方差的差异更为明显,在 12 h 时分析扰动误差协方差大于预报扰动误差协方差,说明多物理 ETKF 对于能量的调整作用更加明显。

图 11 给出了不同预报时间集合扰动的垂直分布,图 11a 为单一 ETKF,图 11b 为多物理 ETKF。由图可知,随着预报时间的延长,两种方案扰动能量离散度均在增加,但是单一 ETKF 增长不够明显,多物理 ETKF 增长更为显著,且增长速度更快。这说明采用不同的物理过程可以使扰动误差得到更快的增长,有效提高集合离散度。

4.4 PECA 分析

PECA 即集合扰动和预报误差相关性分析。该方法由 Wei and Toth (2003) 提出,它仅考虑集合扰动和预报误差的相关关系,去除了由于模式、分析场等因素对于预报结果的影响,更客观的评价集合扰动方案优劣。PECA 定义式为

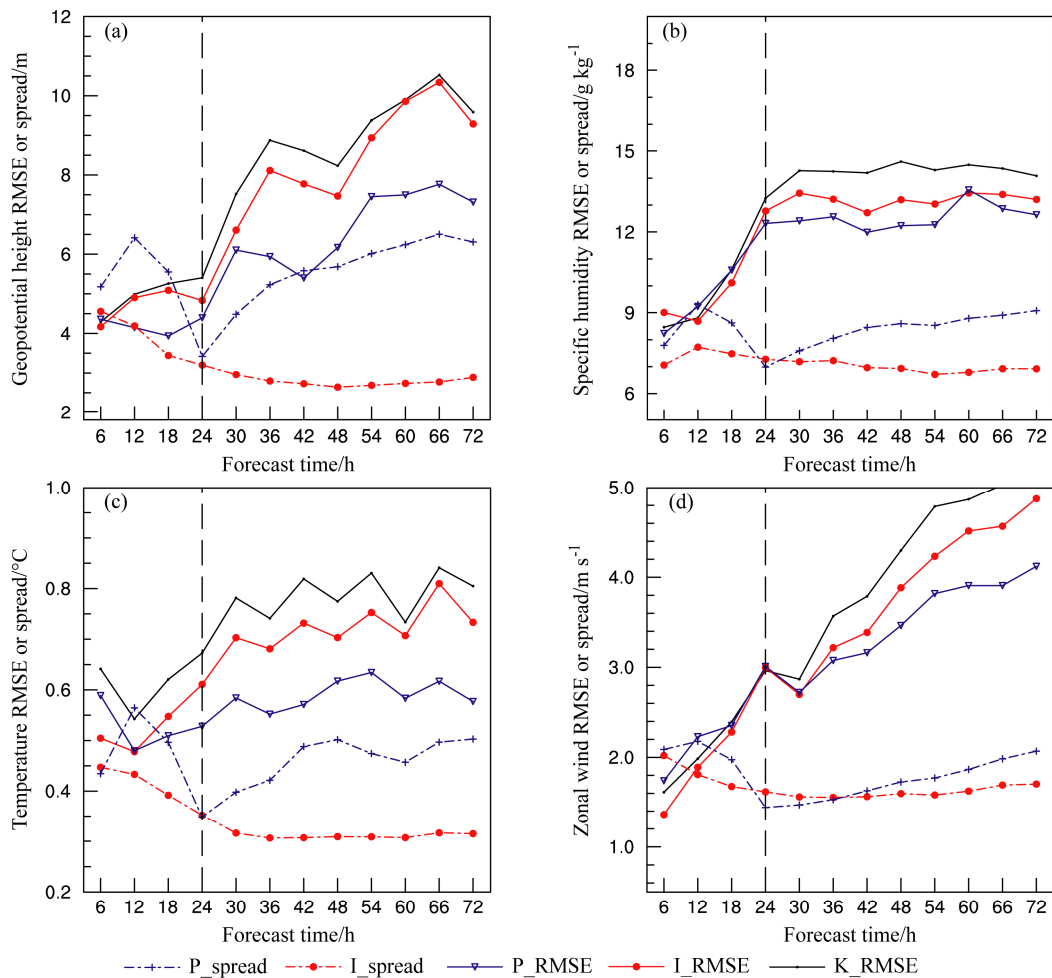


图 4 RMSE (实线)、离散度 (虚线) 随预报时间的演变: (a) 500 hPa 的位势高度; (b) 500 hPa 的相对湿度; (c) 850 hPa 的温度; (d) 850 hPa 的纬向风。黑色虚线代表 ETKF 更新结束的时刻

Fig. 4 Evolutions of RMSE (solid line) and spread (dashed line) with forecast time: (a) 500-hPa GH; (b) 500-hPa RH; (c) 850-hPa temperature; (d) 850-hPa zonal wind. Black dotted line represents the end time of the ETKF updating

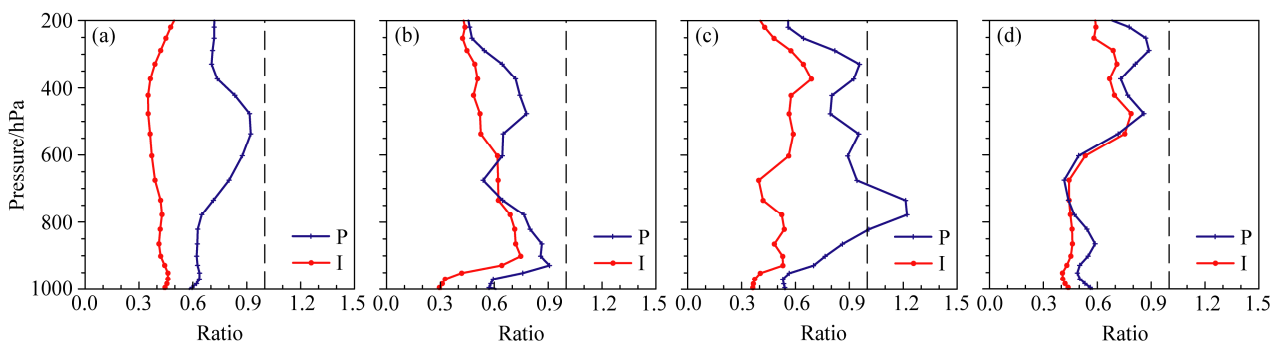


图 5 2010 年 10 月 5 日 00 时 (预报 48 h) 离散度与 RMSE 比值的垂直变化: (a) 位势高度; (b) 相对湿度; (c) 温度; (d) 纬向风。黑色虚线为比值为 1 的线, 下同

Fig. 5 Vertical distribution of ratio of spread to RMSE at 0000 UTC 5 Oct 2010 (48-h forecast): (a) GH; (b) RH; (c) temperature; (d) zonal wind. Black dashed line indicates ratio 1, the same below

$$A_c(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \{\mathbf{X}, \mathbf{Y}\} / \{\mathbf{X}, \mathbf{X}\}^{1/2} \{\mathbf{Y}, \mathbf{Y}\}^{1/2}, \quad (2)$$

其中, $\mathbf{X}$ 代表预报误差 (分析值与控制预报的差), $\mathbf{Y}$ 代表集合扰动 (扰动预报与控制预报的差)。PECA

值越高, 说明集合越能捕捉预报误差的信息, 集合扰动方案越好。

图 12 给出了两种方案 24 h 预报的 PECA 垂直

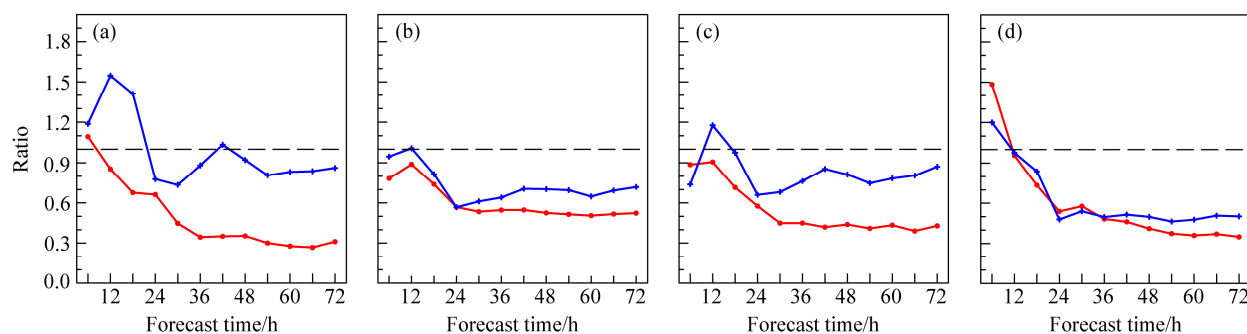


图6 离散度与 RMSE 比值随预报时间的演变: (a) 500-hPa 的位势高度; (b) 500-hPa 的相对湿度; (c) 850-hPa 的温度; (d) 850-hPa 的纬向风
Fig. 6 Evolutions of ratio of spread to RMSE with forecast time : (a) 500-hPa GH; (b) 500-hPa RH; (c) 850-hPa temperature; (d) 850-hPa zonal wind

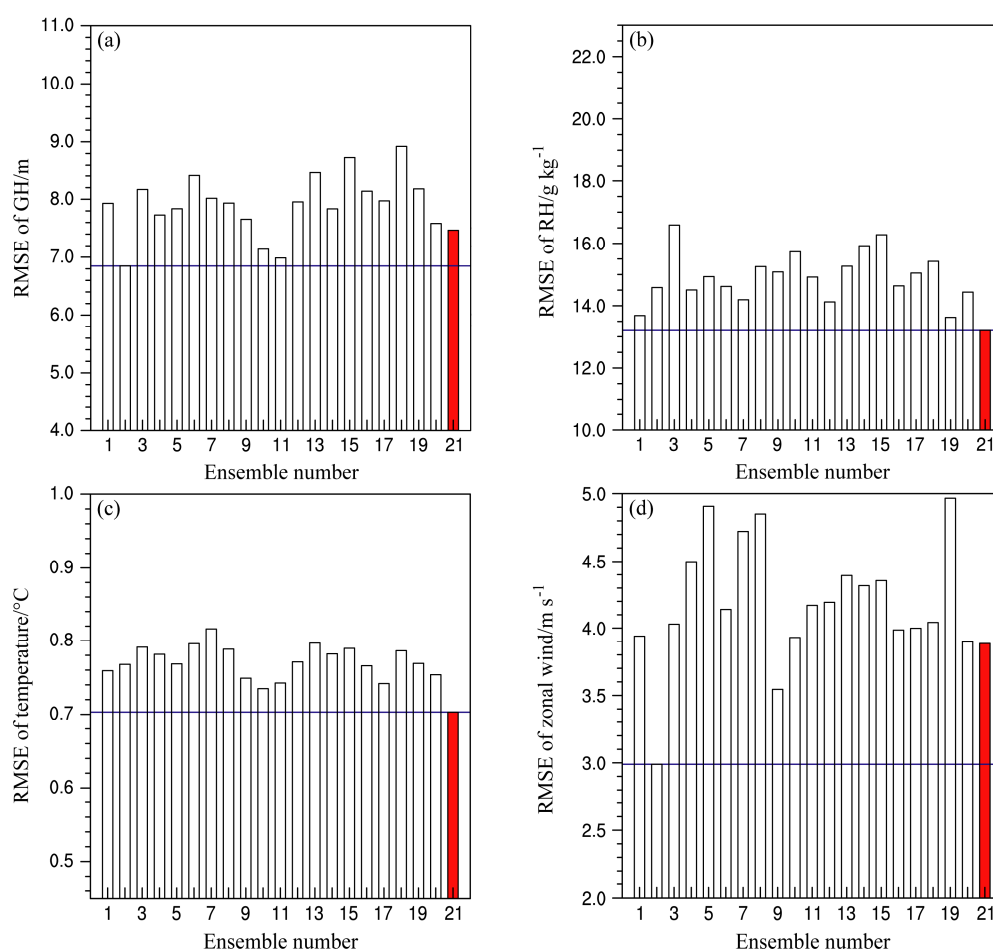


图7 2010年10月5日00时单一ETKF试验(I)各集合成员的RMSE: (a) 位势高度; (b) 相对湿度; (c) 温度; (d) 纬向风。蓝色实线表示RMSE的最小值, 红色柱状代表集合均值

Fig. 7 RMSE of all members in the single-physical ETKF test (I) at 0000 UTC 5 Oct 2010: (a) GH; (b) RH; (c) temperature; (d) zonal wind. Blue line represents the minimum and the red bar represents the mean

分布。由图可以看出, 多物理 ETKF 集合 PECA 的值更大, 也就是说多物理 ETKF 集合扰动方案能更好地捕捉预报误差的信息。同时, 我们发现两者的值均小于 0.5, 这可能是由于积分时间较短以及没有考虑模式误差等其他不确定因素。

5 结论与讨论

在短期区域集合预报中, 仅包含初值不确定的 ETKF 初值扰动方法存在离散度不够、误差较大等问题。为了克服这些不足, 提高暴雨集合预报的准

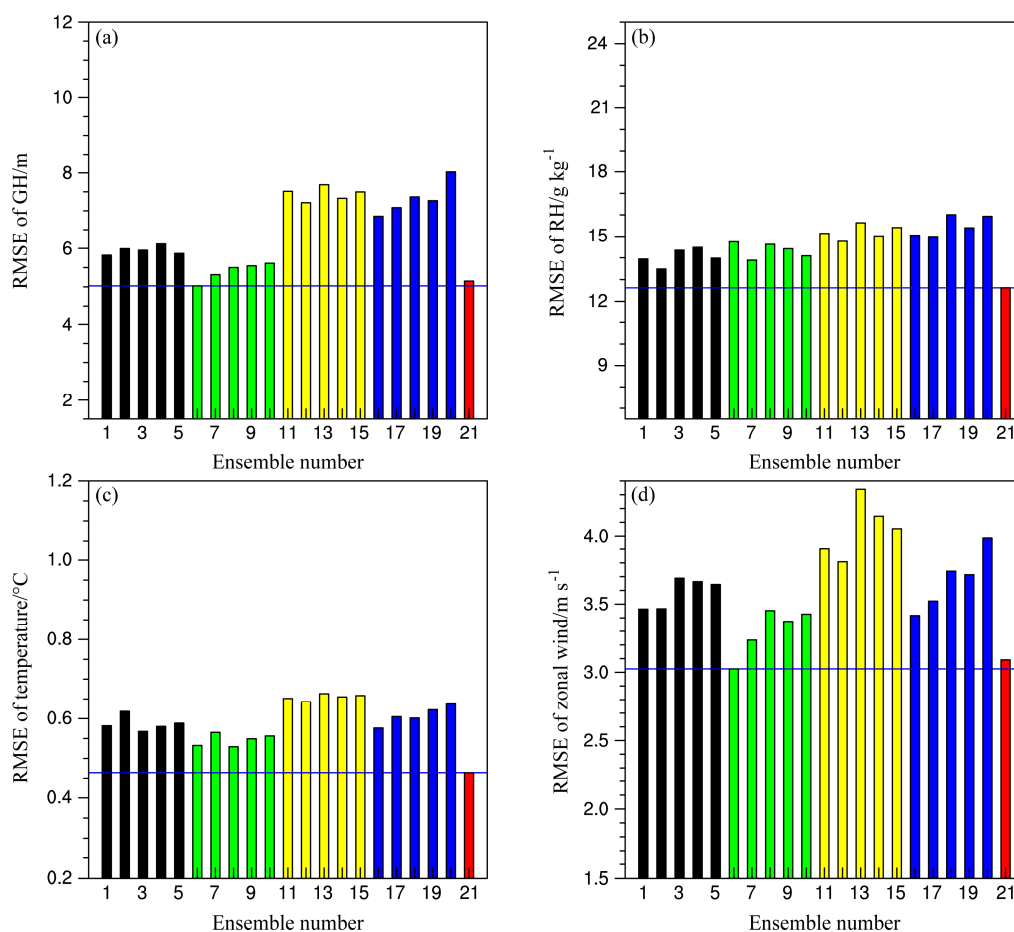


图 8 2010 年 10 月 5 日 00 时多物理 ETKF 试验 (P) 各集合成员的 RMSE: (a) 位势高度; (b) 相对湿度; (c) 温度; (d) 纬向风。黑色填充代表参数化组合 1, 绿色填充代表参数化组合 2, 黄色填充代表参数化组合 3, 蓝色填充代表参数化组合 4

Fig. 8 RMSE of all members in the multi-physical ETKF test P at 0000 UTC 5 Oct 2010: (a) GH; (b) RH; (c) temperature; (d) zonal wind. Bars filled with black and green represent the combination 1 and combination 2, respectively; bars filled with yellow and blue represent the combination 3 and combination 4, respectively

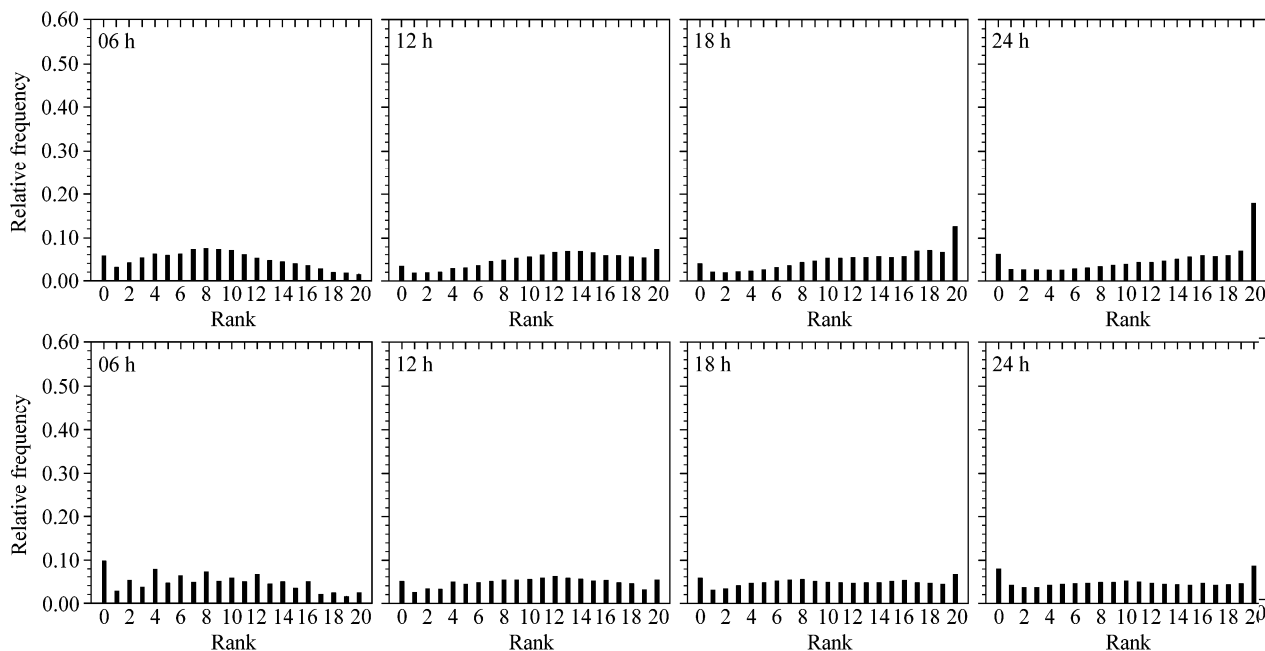


图 9 850 hPa 纬向风的 Talagrand 分布。上为 I 试验, 下为 P 试验

Fig. 9 Talagrand distributions of the forecasted zonal wind at 850 hPa using test I (upper panel) and test P (lower panel)

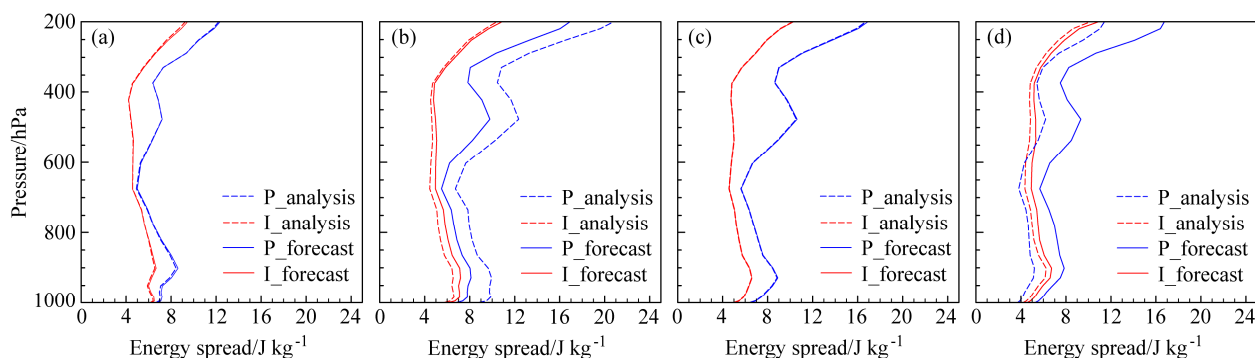


图 10 预报(实线)和分析(虚线)的扰动能量离散度(单位: J kg^{-1})垂直分布: (a) 6 h; (b) 12 h; (c) 18 h; (d) 24 h。红色为 I 试验, 蓝色为 P 试验

Fig. 10 Vertical distributions of predicted perturbation energy spread and analyzed perturbation energy spread (units: J kg^{-1}): (a) 6 h; (b) 12 h; (c) 18 h; (d) 24 h. Red and blue lines represent scheme I and P, respectively

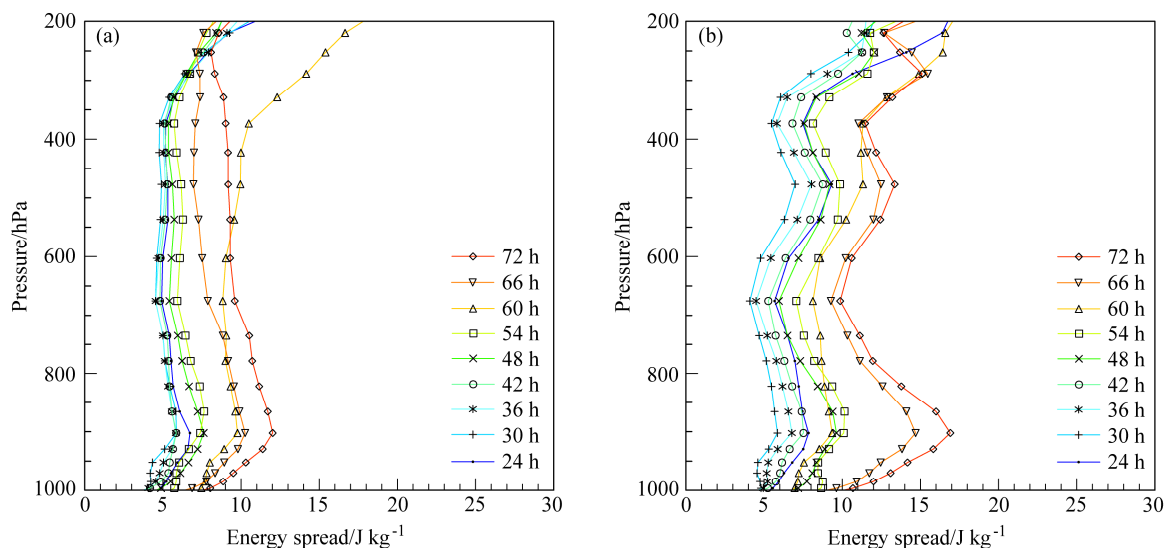


图 11 两种方案扰动能量离散度(单位: J kg^{-1})垂直分布: (a) I 方案; (b) P 方案。不同线形代表不同预报时效

Fig. 11 Vertical distribution of perturbation energy spread (units: J kg^{-1}) using (a) scheme I and (b) scheme P. The different lines represent different forecast time

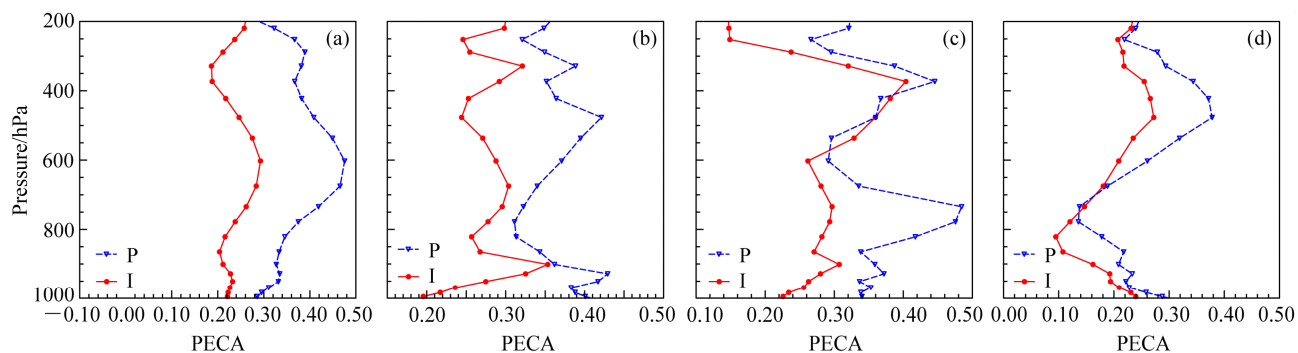


图 12 24 h 预报的两种方案 PECA 垂直分布特征: (a) 位势高度; (b) 相对湿度; (c) 温度; (d) 纬向风。红色为 I 试验, 蓝色为 P 试验

Fig. 12 Vertical distribution of perturbation versus error correlation analysis (PECA) for 24 h forecast using the two schemes: (a) GH; (b) RH; (c) temperature; (d) zonal wind. Red and blue lines represent test I and P, respectively

确性,本文尝试结合区域短期集合预报的特点,在 ETKF 扰动更新中引入物理不确定和边界不确定,构建多初值、多物理、多边值的 ETKF 集合,重点分析了引入多物理参数化对于集合预报效果的影响。并以 2010 年 10 月 3 日到 10 月 6 日海南岛特大暴雨为研究对象,进一步讨论 ETKF 在暴雨集合预报中的应用问题,采用多种集合检验方法对单一 ETKF 和多物理 ETKF 的表现进行综合客观的分析,得出如下结论。

(1) 两种集合方案相对于对照试验预报效果均有一定的改善,集合均值的 RMSE 显著小于对照预报,随着预报时间的增加优势更加明显。

(2) 无论是降水预报还是形势场的预报,多物理 ETKF 较单一 ETKF 表现更好,并且随着预报时间的增加优势更为显著。对于降水预报,多物理 ETKF 对于降水位置的预报有显著的改善。对于形势场预报,多物理 ETKF 的 RMSE 始终小于单一 ETKF;单一 ETKF 集合的离散度较小,且随预报时效的增加没有增长的趋势,而多物理 ETKF 集合离散度随预报时效的增加呈增长趋势,使集合离散度保持更好;多物理 ETKF 的 Talagrand 分布更加平坦;对于能量离散度来说,多物理 ETKF 可以对预报扰动能量离散度有更好的调整,且随着预报时效的增加,预报扰动的能量离散度增长更快,也就是说多物理 ETKF 误差扰动增长更快;通过 PECA 的比较发现,多物理 ETKF 相对于单一 ETKF 来说集合扰动与预报误差相关性更好,能更好地捕捉预报误差的信息。

(3) 通过本文的研究试验,发现将多种物理参数化方案引入 ETKF 初值扰动中,能很好地改善集合离散度,提高预报准确性,进一步说明在区域短期集合预报中,物理不确定性的重要性,多物理 ETKF 显示出良好的发展前景和应用潜力。

由于计算资源等原因,本文仅采用 20 个集合成员,并且多物理参数化方案设计较为简单,仅引入积云对流参数化和边界处理方案;而且对于 ETKF 扰动更新过程的特征分析还不够深入。在下一步工作中,我们将选取更多的个例进行试验,并考虑增加集合数目、引入微物理过程,同时开展研究边界不确定性对于预报效果的影响,进一步探寻多物理 ETKF 在暴雨集合预报应用中的可行性。

参考文献 (References)

Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J. 2001. Adaptive sampling with the

- ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretical aspects [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129: 420–436, doi:10.1175/1520-0493(2001)129<0420:ASWTET>2.0.CO;2.
- Bowler N E, Mylne K R. 2009. Ensemble transform Kalman filter perturbations for a regional ensemble prediction system [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 135 (640): 757–766, doi:10.1002/qj.404.
- Bowler N E, Arribas A, Beare S E, et al. 2009. The local ETKF and SKEB: Upgrades to the MOGREPS short-range ensemble prediction system [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 135 (640): 767–776, doi:10.1002/qj.394.
- 陈超辉. 2010. 短期集合预报关键技术研究 [D]. 中国人民解放军理工大学博士学位论文, 121–124.
- Chen Chaohui. 2010. The research of short-term ensemble forecasts [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), PLA University of Science and Technology, 121–124.
- 陈超辉, 李崇银, 谭言科, 等. 2013. 随机强迫对集合预报效果的影响研究 [J]. *气象学报*, 71 (3): 505–516.
- Chen Chaohui, Li Chongyin, Tan Yanke, et al. 2013. Study of the drift of ensemble forecast effects caused by stochastic forcing [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 71 (3): 505–516, doi:10.11676/qxxb2013.040.
- 公颖. 2010. SAL 定量降水预报检验方法的解释与应用 [J]. *暴雨灾害*, 29 (2): 153–159.
- Gong Ying. 2010. The explanation and application of SAL quantitative verification for precipitation forecasts [J]. *Torrential Rain and Disasters* (in Chinese), 29 (2): 153–159.
- Wernli H, Paulat M, Hagen M, et al. 2008. SAL—A novel quality measure for the verification of quantitative precipitation forecasts [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136: 4470–4487, doi:10.1175/2008MWR2415.1.
- 龙柯吉, 陈静, 马旭林, 等. 2011. 基于集合卡尔曼变换的区域集合预报初步研究 [J]. *成都信息工程学院学报*, 26 (1): 37–46.
- Long Keji, Chen Jing, Ma Xulin, et al. 2011. The preliminary study on ensemble prediction of GRAPES-meso based on ETKF [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology* (in Chinese), 26 (1): 37–46, doi:10.3969/j.issn.1671-1742.2011.01.008.
- Peffer L T. 2011. Hybrid variational ensemble data assimilation with initial condition and model physics uncertainty [D]. M. S. thesis, The Florida State University College of Arts and Sciences.
- 马旭林, Wang Yong, 薛纪善. 2006. 基于 ETKF 理论的有限区域集合预报初始扰动方案及初步试验 [C]//中国气象学会论文集. 北京: 气象出版社.
- Ma Xulin, Wang Yong, Xue Jishan. 2006. Study on ETKF-based initial perturbation scheme for limited area ensemble prediction [C]// Chinese Meteorological Society Proceedings (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press.
- 马旭林, 薛纪善, 陆维松. 2008. GRAPES 全球集合预报的集合卡尔曼变换初始扰动方案初步研究 [J]. *气象学报*, 66 (4): 526–536.
- Ma Xulin, Xue Jishan, Lu Weisong. 2008. Preliminary study on ensemble transform Kalman filter-based initial perturbation scheme in GRAPES global ensemble prediction [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 66 (4): 526–536, doi:10.11676/qxxb2008.050.
- Wei M Z, Toth Z. 2003. A new measure of ensemble performance: Perturbation versus error correlation analysis (PECA) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1549–1565, doi:10.1175/1520-0493(2003)131<1549:ANMOEP>2.0.CO;2.
- Saito K, Seko H, Kunii M, et al. 2012. Effect of lateral boundary perturbations on the breeding method and the local ensemble transform Kalman filter for mesoscale ensemble prediction [J]. *Tellus A*, 64: 11594,

- doi:10.3402/tellusa.v64i0.11594.
- Stensrud D J, Brooks H E, Du J, et al. 1999. Using ensembles for short-range forecasting [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 127: 433–446, doi:10.1175/1520-0493(1999)127<0433:UEFSRF>2.0.CO;2.
- 陶诗言, 赵思雄, 周晓平, 等. 2003. 天气学和天气预报的研究进展 [J]. *大气科学*, 27 (4): 451–467. Tao Shiyan, Zhao Sixiong, Zhou Xiaoping, et al. 2003. The research progress of the synoptic meteorology and synoptic forecast [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (4): 451–467, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.03.
- 田伟红, 庄世宇. 2008. ETKF 方法在区域集合预报中的初步应用 [J]. *气象*, 34 (8): 35–39. Tian Weihong, Zhuang Shiyu. 2008. Application of ETKF method to regional ensemble forecasts [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 34 (8): 35–39.
- 王太微, 陈德辉, 吴曼丽. 2014. GRAPES-EPS 系统的初值生成方法与对比试验研究 [J]. *气象与环境学报*, 30 (2): 23–30. Wang Taiwei, Chen Dehui, Wu Manli. 2014. Two methods of initial perturbation generation and both comparison in the GRAPES-EPS system [J]. *J. Meteor. Environ. (in Chinese)*, 30 (2): 23–30.
- Wang X G, Bishop C H. 2003. A comparison of breeding and ensemble transform Kalman filter ensemble forecast schemes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 60 (9): 1140–1158, doi:10.1175/1520-0469(2003)060<1140:ACOBAE>2.0.CO;2.
- Wang X G, Bishop C H, Julier S J. 2004. Which is better, an ensemble of positive–negative pairs or a centered spherical simplex ensemble? [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132: 590–1605, doi:10.1175/1520-0493(2004)132<1590:WIBAE0>2.0.CO;2.
- Wang X G, Hamill T M, Whitaker J S, et al. 2007. A comparison of hybrid ensemble transform Kalman filter–optimum interpolation and ensemble square root filter analysis schemes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135: 1055–1076, doi:10.1175/MWR3307.1.
- Wei M Z, Toth Z, Wobus R, et al. 2006. Ensemble transform Kalman filter based ensemble perturbations in an operational global prediction system at NCEP [J]. *Tellus A*, 58 (1): 28–44, doi:10.1111/j.1600-0870.2006.00159.x.
- 张涵斌, 陈静, 智协飞, 等. 2014. 基于 GRAPES_Meso 的集合预报扰动方案设计与比较 [J]. *大气科学学报*, 37 (3): 276–284. Zhang Hanbin, Chen Jing, Zhi Xiefei, et al. 2014. Design and comparison of perturbation schemes for GRAPES_Meso based ensemble forecast [J]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 37 (3): 276–284.
- 赵思雄, 孙建华. 2013. 近年来灾害天气机理和预测研究的进展 [J]. *大气科学*, 37(2): 297–312. Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2013. Study on mechanism and prediction of disastrous weathers during recent years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (2): 297–312, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12317.